



SABINA

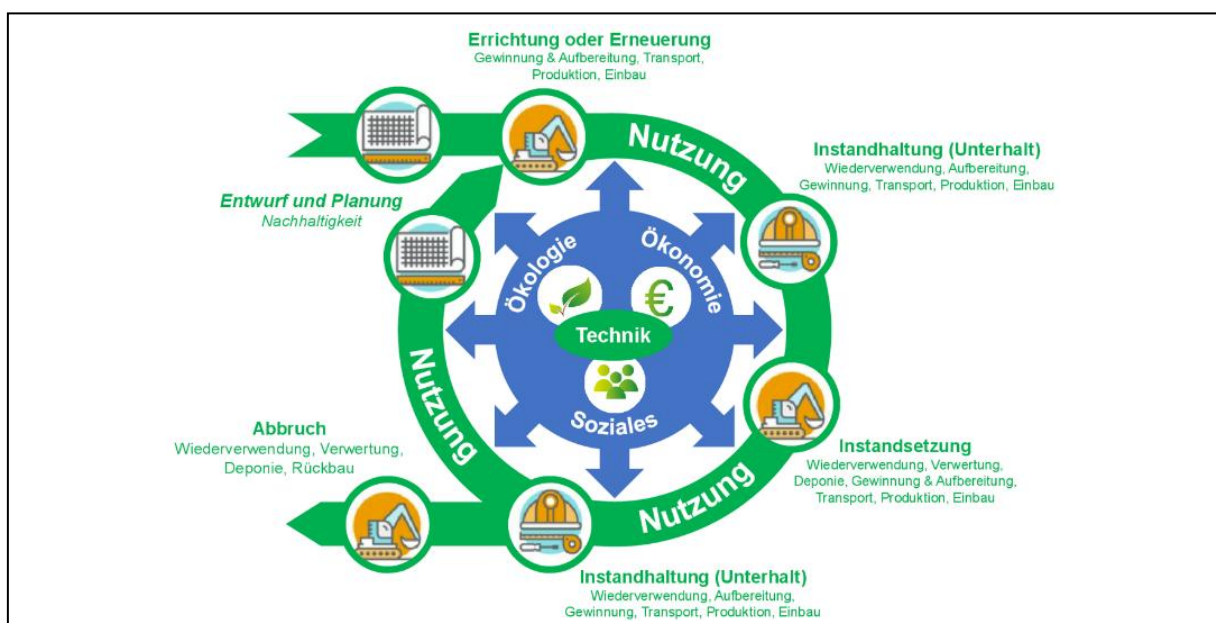
Strassenbauweisen Bilanzierung Nachhaltigkeit

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

D-A-CH Kooperation

Verkehrsinfrastrukturforschung 2022

D-A-CH 2022



Januar 2026

Impressum

Programmerstellung und -finanzierung der D-A-CH Kooperation:

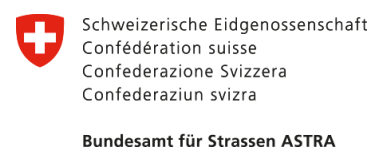
Bundesministerium für Verkehr (BMV)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland



Bundesministerium für Innovation, Mobilität und
Infrastruktur (BMIMI)
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich



Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Papiermühlestrasse 13
3063 Ittigen
Schweiz



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich



Für den Projektinhalt verantwortlich:

Umtec Technologie AG
Eichtalstrasse 54
8634 Hombrechtikon, Schweiz



Technische Universität-Braunschweig
Institut für Straßenwesen
Beethovenstraße 51 b
38106 Braunschweig, Deutschland



Hochschule Campus Wien – University of Applied Sciences
Department Bauen und Gestalten
Favoritenstraße 226
1100 Wien, Österreich



SABINA

Strassenbauweisen Bilanzierung Nachhaltigkeit

D-A-CH 2022

Auftragnehmer

Umtec Technologie AG, Schweiz

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Deutschland

Hochschule Campus Wien, Department Bauen und Gestalten, Österreich

Autorinnen und Autoren

Thomas POHL, MSc.

Dr. Alfred WENINGER-VYCUDIL

Univ.-Prof. Dr. Michael P. WISTUBA

DIⁱⁿ Nina SAM

Dominik OSTERWALDER, MSc.

Nick SPITZHOFFER, BSc.

Auftragnehmerinnen:

Umtec Technologie AG, Schweiz

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Deutschland

Hochschule Campus Wien, Department Bauen und Gestalten, Österreich

Inhalt

1	Einleitung und Aufgabenstellung	8
1.1	Zielsetzung	8
1.2	Zielgruppe und Anwendungsbereich	9
2	Begriffsdefinitionen	11
2.1	Allgemeines	11
2.2	Zusammenfassung der massgebenden Begriffe	11
3	Aktuelle Literatur und Stand der Technik	21
3.1	Gliederung und Einteilung	21
3.2	Vorgehensweise bei der Auswahl der massgebenden Literatur	21
3.3	Normen und Richtlinien	21
3.3.1	Bautechnische Gestaltung des Strassenoberbaus	21
3.3.2	Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen	24
3.3.3	Planung von Erhaltungsmassnahmen	28
3.3.4	Ökobilanzierung (Lebenszyklusbewertung)	33
3.4	Forschungsberichte	35
3.5	Öko-Datenbanken	38
3.6	Sonstige Grundlagen und Literatur	38
3.7	Zusammenfassung der relevanten Grundlagen	39
4	Untersuchungsrahmen und Einflussfaktoren	41
4.1	Untersuchungsrahmen	41
4.1.1	Beschreibung des Untersuchungsgegenstands	41
4.1.2	Technischer Geltungsbereich	41
4.1.3	Zeitlicher Geltungsbereich	43
4.1.4	Geographischer Geltungsbereich	44
4.1.5	Systemumfang und Gliederung	45
4.1.6	Funktionelle Einheit	45
4.2	Einflussfaktoren	46
4.2.1	Ökologische Einflussfaktoren	46
4.2.2	Ökonomische Einflussfaktoren	49
4.2.3	Soziale Einflussfaktoren	54
5	Datengrundlage und Datenmanagement	60
5.1	Materialdaten	60
5.2	Prozessdaten	61
5.2.1	Herstellung (Module A1 bis A3)	61

5.2.2	Transport (Module A2, A4 und C2).....	66
5.2.3	Errichtung (Modul A5) und Rückbau (Modul C1)	67
5.2.4	Nutzung (Module B1 bis B4).....	70
5.2.5	Entsorgung (Module C3 und C4).....	70
5.3	Ökobilanzdaten	71
5.3.1	Datenbanken.....	71
5.3.2	Verwendete Wirkungsabschätzungsmethoden.....	72
6	Berechnung der Bewertungsindikatoren.....	76
6.1	Randbedingungen und grundlegende Modellansätze.....	76
6.1.1	Allgemeine Randbedingungen.....	76
6.1.2	Strassenaufbau	77
6.1.3	Verkehrskennzahlen.....	84
6.1.4	Treibstoff- und Energieverbrauch	87
6.1.5	GWP-Auswirkungen durch Verkehrsbeeinträchtigung während einer Erhaltungsmassnahme.....	98
6.1.6	Einsparungen GWP durch eine Verbesserung des Strassenzustands.....	107
6.1.7	Abschätzung des Unfallgeschehens bei Erhaltungsmassnahmen	112
6.2	Bilanzmodelle und Vergleichsindikatoren	115
6.2.1	Kennzahlen der ökonomischen Bilanzierung	115
6.2.2	Kennzahlen der ökologischen Bilanzierung der Erhaltungsmassnahmen	117
6.2.3	Kennzahlen der Verkehrssicherheit der Erhaltungsmassnahmen.....	118
6.2.4	Kennzahlen der sozio-ökologischen Bilanzierung der Langzeitwirkungen von Erhaltungsmassnahmen.....	118
6.2.5	Gesamtbilanz und Vergleichsmöglichkeiten	119
7	SABINA-Bilanzrechner	121
7.1	Grundlagen des SABINA-Bilanzrechners	121
7.2	Technischer Anwendungsbereich.....	121
7.3	Überblick Eingangsdaten.....	122
7.4	Öko-Datenbanken	123
7.5	Webbasierte Lösung	124
7.6	Implementierung.....	125
8	Demonstration der Potenziale des SABINA-Bilanzrechners	127
8.1	Wahl der Berechnungsvarianten	127
8.2	Allgemeine Eingangsdaten für alle Berechnungsvarianten	128
8.3	Variation Asphaltarten	132
8.3.1	Eingangsdaten Oberbauvarianten	132
8.3.2	Ergebnisse	143

8.4	Vergleich Oberbauweisen mit gleicher technischer Nutzungsdauer	155
8.4.1	Eingangsdaten Oberbauvarianten	155
8.4.2	Ergebnisse	165
8.5	Vergleich Oberbauweisen mit unterschiedlichen Nutzungsdauern	176
8.5.1	Eingangsdaten Oberbauvarianten	176
8.5.2	Ergebnisse	184
9	Empfehlungen und Best Practice Katalog	201
9.1	Allgemeines.....	201
9.2	Grenzen und Unsicherheiten des SABINA-Bilanzrechners.....	201
9.2.1	Modellgrenzen und methodische Annahmen.....	201
9.2.2	Unsicherheiten in den Eingangsdaten	202
9.2.3	Begrenzung des Analysezeitraums, Grenzen der Vergleichbarkeit.....	202
9.2.4	Abbildung von Verkehrs- und Baustellenwirkungen.....	203
9.3	Verwendung möglichst nachhaltiger Strassenbaumaterialien	203
9.4	Verwendung nachhaltiger Baumaschinen und Transportmittel	206
9.5	Optimierung der Lebenszyklen und Erhaltungsintervalle	206
9.6	Ausführungsqualität von Erhaltungsmaßnahmen	208
9.7	Verkehrsführung und Gestaltung von Baustellen.....	208
10	Zusammenfassung.....	211
10.1	Zielsetzung, Vorgehensweise und Grundlagen	211
10.2	SABINA-Bilanzrechner: Optimierungs- und Einsparungspotenziale.....	212
10.3	Form des SABINA-Bilanzrechners und Implementierung	213
10.4	Schlussfolgerung und Projektnutzen	214
11	Literatur.....	216
12	Abbildungen	224
13	Tabellen	226
	Anhang A: Implementierungsleitfaden	228
	Anhang B: Benutzungshandbuch.....	249
	Anhang C: Pflichtenheft	283

Hinweise zu Schreibweisen

Entgegen der Rechtschreibung in Deutschland und Österreich wird in der Schweiz das „ß“ generell durch „ss“ ersetzt, also auch nach langen Vokalen und Diphthongen. In diesem Bericht ist die schweizerische Schreibweise übernommen, der Buchstabe „ß“ wird nur bei Eigennamen und bei nationalen Quellenbezeichnungen beibehalten.

In diesem Bericht wird der Dezimalpunkt anstelle des Dezimalkommas verwendet, wie dies in einigen Schweizer Kantonen üblich ist.

In Bezug auf die gendergerechte Schreibweise wird in diesem Bericht zur besseren Lesbarkeit stets das generische Femininum verwendet. Die feminine Form bezieht sich nicht nur auf Frauen, sondern auf Personen aller Geschlechter.

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

1.1 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojekts SABINA ist die Bereitstellung eines Tools (SABINA-Bilanzrechner als Software) zur ganzheitlichen Bewertung der Nachhaltigkeit von Strassenbefestigungen im Hochleistungsstrassennetz unter Identifizierung und besonderer Berücksichtigung der Kriterien des Treibhauspotenzials, des Energieverbrauchs und der Dauerhaftigkeit. Es werden damit Strassenkonstruktionen (Oberbau und Unterbau; alle Bauweisen) nach ökologischen, technischen und ökonomischen sowie gesellschaftlich relevanten Gesichtspunkten bewertet.

Bewertungsgrundlagen sind eine Ökobilanzierung unter Heranziehung der Treibhausgasemissionen (GWP, Global Warming Potential) und des Gesamtenergieaufwands (KEA, Kumulierter Energieaufwand inklusive Grauenergie) sowie die technischen Vorgaben gemäss den nationalen technischen Regelwerken (Deutschland, Österreich, Schweiz) zur Sicherstellung der Qualitäts- und Dauerhaftigkeitsanforderungen. Umweltwirkungen, die mittels GWP oder KEA in der Ökobilanz nicht abbildbar sind, werden z. B. nach der Methode der ökologischen Knappheit (UBP, Umweltbelastungspunkte UBP) oder der Environmental Footprint 3.1-Methode (EF 3.1) berücksichtigt.

Der Bewertungsrahmen umfasst alle Vorgaben, Entscheidungen und baulichen Umsetzungen von Strassenkonstruktionen sowie deren Ausbau und Wiederverwendung bei Errichtungs- oder Erneuerungsmassnahmen (Instandhaltung bis Generalerneuerung). Er deckt den gesamten Lebenszyklus einer Strassenkonstruktion ab. Er schliesst auch die Wirkungen auf Emissionen von Nutzenden der Strasse ein, die gegebenenfalls bei der Durchführung von baulichen Massnahmen entstehen oder die Folge eines verbesserten Strassenzustands sind. Der Bewertungsrahmen wird als Anwenderinnen-freundliche Software bereitgestellt (SABINA-Bilanzrechner), unter besonderer Berücksichtigung einer einfachen, intuitiven Bedienbarkeit.

Ausgangspunkt für das gegenständliche Projekt ist eine Zusammenstellung der Grundlagen aus der aktuellen Literatur und laufender Forschung sowie der massgebenden nationalen Technischen Regelwerke in den D-A-CH-Ländern (Deutschland, Österreich, Schweiz). Darüber hinaus werden die massgebenden Begriffe zum Forschungsthema definiert (Arbeitspaket 2). Das Literaturstudium umfasst im Wesentlichen:

- Relevante nationale und internationale Regelwerke (Normen, Richtlinien)
- Aktuelle Veröffentlichungen (aktuelle Forschungsprojekte) in den D-A-CH-Ländern

- Literatur aus anderen europäischen und aussereuropäischen Ländern, insbesondere zu den Themen Ökobilanzierung, Treibhausgasemissionen, Gesamtenergieaufwand, Lebenszyklus, Bauweisen, Baustoffe, Rezepturen, Herstellung, Wiederverwendung, Erhaltung
- Öko-Datenbanken mit Projektrelevanz
- Forschungsaktivitäten der Projektbearbeitenden

Auf der Grundlage der Zusammenstellung von Literatur, Grundlagen und Definitionen erfolgt eine systematische Aufbereitung unter Bezugnahme auf deren Relevanz zur Projektfragestellung sowie zu den geführten Diskussionen mit den Auftraggeberinnen. Das Ergebnis ist die Dokumentation dieser Grundlagen wie folgt:

- Tabellarische Zusammenstellung der Literatur mit entsprechenden Angaben der Quellen (Normen und Richtlinien; Forschungsberichte; Öko-Datenbanken; sonstige Grundlagen und Literatur)
- Beurteilung der Relevanz im Hinblick auf die Forschungsfrage
- Analyse von Kennwerten für eine Aufnahme in die SABINA-Datenbank (als Input für das Arbeitspaket AP6)
- Zusammenstellung der für SABINA massgebenden Definitionen (gegebenenfalls mit Anpassungen)

1.2 Zielgruppe und Anwendungsbereich

Die primäre Zielgruppe an Anwenderinnen sind die Auftraggeberinnen des Projekts SABINA, nämlich die nationalen Strassenverwaltungen in Deutschland, Österreich und der Schweiz (auf technischer Ebene).

SABINA ist als Entscheidungshilfe für die Untersuchung unterschiedlicher Oberbauvarianten konzipiert und erfordert die Eingabe von zum Teil detaillierten Daten hinsichtlich der Materialien, Lebenszyklen, Erhaltungsmassnahmen, etc., die auch einen entsprechend detaillierten Planungsstand voraussetzen. Dies erfordert seitens der Anwenderinnen ausreichende Fachkenntnisse und -kompetenzen in der Strassenbautechnik.

Für den Entscheidungsprozess ist (mit der geplanten Ausbaustufe des SABINA-Bilanzrechners als Prototyp) zumindest der Bearbeitungsstand einer Einreichplanung nötig, in dem die Randbedingungen für die Auswahl und den Vergleich von Varianten des Strassenoberbaus definiert sind. Der SABINA-Bilanzrechner soll und kann zu Probezwecken zum Vergleich von

Angebotsvarianten (sofern zugelassen) herangezogen werden, im Speziellen bei der Festlegung von Erhaltungsmassnahmen im Bereich der Bauprogrammerstellung bzw. der damit verbundenen Projektentwicklung. Er kann die notwendigen Ergebnisse für den technischen Dialog zwischen allen eingebundenen Expertinnen liefern.

Weil der SABINA-Bilanzrechner (in der geplanten Ausbaustufe als Prototyp) ausschliesslich eine Bewertung der Strassenbefestigung beinhaltet, ist er für Entscheidungsprozesse, wo mehrere Anlagen zu berücksichtigen und gegebenenfalls die Wirkungen durch mehrere Anlagen zu vergleichen sind (z. B. Vergleich der Varianten *lärmmindernde Asphaltdeckschicht* und *Lärmschutzwand*), nur eingeschränkt einsetzbar, kann aber die Grundlage für zukünftige Erweiterungen bzw. Verknüpfungen mit anderen Entscheidungsinstrumenten bilden. Die geplante Ausbaustufe des SABINA-Bilanzrechners sieht dies jedoch nicht explizit vor.

Die Auftragnehmerinnen halten fest, dass der im Projekt entwickelte SABINA-Bilanzrechner ein Prototyp ist. Seine Anwendbarkeit ist zunächst in allen D-A-CH-Ländern sichergestellt, jedoch können sich im weiteren Verlauf der nationalen Erprobung im Anschluss an das Projekt SABINA spezifische Änderung- und Ergänzungswünsche bzw. neue nationale Vorgaben für die Bilanzerstellung ergeben. Basierend auf dem SABINA-Bilanzrechner sind die Auftragnehmerinnen in der Lage, individuelle Weiterentwicklungen des SABINA-Bilanzrechners entsprechend den Wünschen und Vorgaben der nationalen Strassenbauverwaltungen vorzunehmen.

2 BEGRIFFSDEFINITIONEN

2.1 Allgemeines

Im Zuge der Aufarbeitung der Grundlagen wurden neben der massgebenden Literatur auch die wesentlichen Fachbegriffe aus den D-A-CH-Ländern verglichen und daraus einheitliche, länderübergreifend verständliche Begriffsbestimmungen für das Projekt SABINA abgeleitet.

Nachfolgend sind zusammenfassend jene Begriffsbestimmungen aufgeführt, welche für das Forschungsprojekt SABINA nach Meinung der Auftragnehmerinnen von besonderer Bedeutung sind und die sprachliche Grundlage, für die im Rahmen des Projekts zu erarbeitenden Methoden bilden. Die Begriffsbestimmungen basieren auf den Literaturquellen in Tabelle 1.

Es sei explizit angemerkt, dass es sich hierbei um Begriffe aus den Bereichen Strassenbau-technik, Bauökologie, Lebenszyklus- und Erhaltungsmanagement handelt und diese daher von ähnlichen Begriffen aus anderen Fachgebieten abweichen können.

Tabelle 1: Überblick zu den Quellen für die Begriffsbestimmungen im Projekt SABINA

Autoren, Erscheinungsjahr	Titel
A. Weninger-Vycudil A., B. Brozek, T. Kessel, J. Kutz, B. Chylik, C. Schranz, D. Prammer, A. Vorwagner, P. Curschellas & R. Bühlmann, 2019 [1]	D-A-CH Forschungsprojekt TAniA - Technische Anlagenbewertung im Asset-Management:
M. Hauschild, R. Rosenbaum & S. Olsen, 2018 [2]	Life Cycle Assessment
R. Peyrl, 2014 [3]	Ökobilanzen und Lebenszyklusanalysen - Möglichkeiten und Grenzen
Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022 [4]	Climate Change 2022: Synthesis Report
W. Klöpffer & B. Grahl, 2014 [5]	Life Cycle Assessment – A Guide to Best Practice
M. Hauschild & M. Huijbregts, 2015 [6]	Life Cycle Impact Assessment
M. Curran, 2017 [7]	Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment
G. Sonnemann & M. Margni, 2015 [8]	Life Cycle Management

2.2 Zusammenfassung der massgebenden Begriffe

Auf Basis der vorhandenen Begriffsdefinitionen in den D-A-CH-Ländern, der Diskussionen mit den Strassenerhalterinnen im Zuge von Workshops sowie der für den Bewertungsrahmen von SABINA notwendigen Spezifikationen haben sich folgende Begriffe als massgebend herausgestellt.

Technischer Lebenszyklus (= Lebensdauer)

Der technische Lebenszyklus (= Lebensdauer) reicht von der Errichtung oder Neukonstruktion einer Anlage der Verkehrsinfrastruktur bis zu ihrem Abbruch oder der Ausserdienststellung. [1]

Technische Nutzungsdauer

Die technische Nutzungsdauer entspricht jenem Zeitraum, in dem eine abnutzbare Anlage technisch in der Lage ist, ihren Verwendungszweck zu erfüllen. Sie beginnt mit der Herstellung bzw. Errichtung der Anlage und endet mit jenem Zeitpunkt, zu dem die Anlage soweit abgenutzt oder substanziell zerstört ist, dass eine bestimmungsgemässe Nutzung nicht mehr möglich ist. [1]

Grenzzustand der bestimmungsgemässen Nutzung

Der Grenzzustand der bestimmungsgemässen Nutzung entspricht jenem Grenzwert des Zustandes des untersuchten Systems (Produkt, Anlage(nteil), Dienstleistung), ab dem das System nicht mehr in der Lage ist, seine bestimmungsgemässe Nutzung zu erfüllen, wodurch Massnahmen (z. B. Beschränkung der Nutzung) notwendig werden. [1]

Zustand

Der Zustand definiert sich über das Mass der Schädigung eines Bauteils bzw. Anlagenteils oder der gesamten Anlage. [1]

Erhaltungsmassnahme

Erhaltungsmassnahmen sind bauliche Massnahmen, die in den meisten Fällen eine zustandsverbessernde Wirkung haben, da Schäden beseitigt oder zumindest die Schadensentwicklung gebremst und somit der Zustandsverlauf verändert wird. Hierzu zählen Instandhaltungs-, Instandsetzungs- und Erneuerungsmassnahmen. [1]

Instandhaltung(smassnahmen)

Instandhaltungsmassnahmen verringern bzw. vermeiden eine progressive Schadenentwicklung, führen jedoch nicht zu einer gänzlichen Beseitigung des Schadens bzw. der Schadensursache. [1]

Instandsetzung(smassnahmen)

Instandsetzungsmassnahmen stellen eine Verbesserung der Bausubstanz dar. [1]

Erneuerung(smassnahmen)

Erneuerungsmassnahmen stellen weitreichende Massnahmen dar, welche als Ergebnis einen neuwertigen Zustand auf Basis des aktuellen Stands der Technik haben. [1]

System

Das untersuchte System ist entweder ein Produkt, eine Anlage bzw. ein Anlagenteil oder eine Dienstleistung.

Ökobilanz, Ökobilanzierung

Die Ökobilanz (Englisch: LCA, Life Cycle Analysis) ist ein Werkzeug, um die Auswirkungen von Produkten, Dienstleistungen oder Aktivitäten auf die Umwelt zu quantifizieren und zu bewerten. Die Ökobilanz umfasst den gesamten Lebenszyklus eines Systems, von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, den Transport, die Nutzung bis hin zur Entsorgung bzw. Wiederverwendung. Ökobilanzen können als Hilfswerkzeug verwendet werden, um die Umweltauswirkungen von Systemen zu vergleichen, um Umweltmanagementstrategien zu entwickeln und um Entscheidungen über die Auswahl von nachhaltigen Systemen zu unterstützen. Ökobilanzen basieren auf umfassenden Daten und wissenschaftlichen Methoden und Modellen und beziehen sich im Regelfall auf eine Reihe von Umweltwirkungskategorien wie zum Beispiel Klimawandel, Ozonabbau, Luftverschmutzung und Ressourcenverbrauch.

Den zugehörigen Prozess zur systematischen Erfassung und Bewertung von Stoff- und Energieströmen sowie Emissionen nennt man Ökobilanzierung. Diese besteht aus vier Phasen, welche iterativ durchlaufen werden:

- Definition des Ziels und der Rahmenbedingungen: In dieser Phase werden die Ziele der Ökobilanz festgelegt, die funktionelle Einheit definiert und die Systemgrenze der Studie beschrieben.
- Sachbilanz: In dieser Phase werden alle relevanten Material- und Ressourcenströme, die im Lebenszyklus des untersuchten Systems auftreten, identifiziert und quantifiziert.
- Wirkungsabschätzung: In dieser Phase werden die Auswirkungen auf die Umwelt, der in der Sachbilanz identifizierten Material- und Ressourcenströme berechnet. Dabei

werden Wirkungsmodelle und Indikatoren für eine quantitative Auswirkungsbewertung herangezogen.

- Auswertung und Interpretation: In dieser Phase werden die Ergebnisse der Ökobilanz, aufgrund der Zielsetzung der Studie, interpretiert, bewertet und oft in Form von Diagrammen, Grafiken und Tabellen aufbereitet.

Definition des Ziels und der Rahmenbedingungen

Eine Ökobilanz beginnt mit der Definition des Zwecks der Studie. Warum wird diese Studie durchgeführt? Welche Frage(n) soll sie beantworten und für wen wird sie durchgeführt? Die Zieldefinition setzt den Kontext der Ökobilanz fest und bildet mit den gewählten Rahmenbedingungen die Grundlage der Studie. Dabei werden folgende Punkte definiert:

- Die Definition der funktionellen Einheit: Eine quantitative Beschreibung der Funktion oder des Dienstes, für welche die Bewertung durchgeführt wird.
- Die Eingrenzung des untersuchten Systems und die Entscheidung, welche Aktivitäten und Prozesse zum Lebenszyklus des untersuchten Systems gehören.
- Die Auswahl der Bewertungsparameter, d. h. die Auswirkungen, die in der Studie bewertet werden sollen.
- Die Auswahl des geographischen und des zeitlichen Geltungsbereichs der Studie.
- Die Identifizierung der geeigneten Allokationsmethoden.
- Die Entscheidung über die Perspektive in der Studie: Soll es sich um eine *konsequente Studie* handeln, welche die Auswirkungen bewertet, welche sich aus der Wahl einer Alternative über eine andere ergeben können. Oder handelt es sich um eine , welche die mit der untersuchten Aktivität verbundenen Auswirkungen auf die Umwelt bewertet?
- Die Identifizierung des Bedarfs an einer kritischen Überprüfung, insbesondere wenn die Studie eine vergleichende Aussage darstellen soll (die der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird).

Funktionelle Einheit (FE)

Die funktionelle Einheit (FE) dient als Referenz, um den Nutzen des betrachteten Systems zu messen. Sie stellt die Bezugsgrösse dar, auf welche die Flüsse der Inputs und Outputs aus der Sachbilanz bezogen werden. Die funktionelle Einheit beschreibt die qualitativen

und quantitativen Aspekte der Funktion und beantwortet typischerweise die folgenden Fragen: Was wird gemacht, wie viel, wie lange oder wie oft, wo und wie gut? Es ist wichtig zu beachten, dass die Einheit immer eine Funktion und nicht nur eine physikalische Grösse wie 1 kg, 1 l oder 1 MJ enthalten sollte. Es ist wichtig, die funktionelle Einheit richtig zu definieren, da sie den Weg, wie eine Ökobilanzierung durchgeführt wird, ihre Ergebnisse und Interpretationen erheblich beeinflusst, insbesondere in vergleichenden Studien. Dies liegt daran, dass die funktionelle Einheit als Referenzpunkt dient, um zu entscheiden, welche Prozesse miteinzubeziehen sind. Es ist daher essenziell, dass die Funktionseinheit alle relevanten funktionellen Aspekte des untersuchten Systems vollständig erfasst.

Systemgrenze

Die Systemgrenze markiert die Grenzen zwischen dem untersuchten System und der umgebenden Wirtschaft (*Technosphäre*) und der Umwelt (*Biosphäre*). Diese Grenzen werden so gewählt, dass das erforderliche Mass an Vollständigkeit bei der Modellierung des untersuchten Systems erreicht wird. Dazu wird definiert, welche Teile des untersuchten Systems enthalten sind und welche ausgeschlossen werden können. Die Lebenszyklusphasen (Produktion, Herstellung, Nutzung und Entsorgung) und die wichtigsten darin enthaltenen Prozesse werden festgelegt. Die Systemgrenze hat einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz, da sie bestimmt, aus welchen Prozessen die resultierende Umweltauswirkungen quantifiziert werden sollten. Es gibt zwei besonders bewährte Ansätze für Systemgrenzen:

- *Cradle to Gate* bezeichnet die Systemgrenze, die den Lebenszyklus eines Produkts von seiner Rohstoffgewinnung (*Cradle*) bis zur Herstellung (*Gate*) umfasst. Das bedeutet, dass bei der Ökobilanzierung eines Produkts alle Umweltauswirkungen berücksichtigt werden, die von der Rohstoffgewinnung über die Produktion bis hin zur Verpackung und zum Transport bis zum Werkstor (*Gate*) entstehen.
- Im Gegensatz dazu umfasst die Systemgrenze *Cradle to Cradle* den gesamten Lebenszyklus eines Produkts von der Rohstoffgewinnung (*Cradle*) bis zur Wiederverwendung oder Wiederaufbereitung (*Cradle*). Hier wird also nicht nur die Herstellung, sondern auch die Nutzung und Entsorgung des Produkts betrachtet.

Allokationsmethoden

Allokationsmethoden in der Ökobilanz werden verwendet, um die Auswirkungen von un-

tersuchten Systemen auf die Umwelt auf die einzelnen Lebenszyklusphasen oder -aktivitäten zu verteilen. Allokationsmethoden werden insbesondere dann verwendet, wenn ein System aus mehreren Komponenten besteht, die unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt haben, oder wenn das untersuchte System gemeinsam mit anderen Produkten, Anlage(teilen) oder Dienstleistungen erbracht bzw. hergestellt wird. Es gibt verschiedene Allokationsmethoden, die in der Ökobilanz verwendet werden können:

- *Massenallokation*: Die Auswirkungen werden proportional zur Masse der einzelnen Komponenten oder Aktivitäten verteilt.
- *Funktionenallokation*: Die Auswirkungen werden verteilt proportional zur Funktion oder zum Nutzen, die bzw. der von den einzelnen Komponenten oder Aktivitäten geleistet wird.
- *Ökonomische Allokation*: Die Auswirkungen werden proportional zum ökonomischen Wert der einzelnen Komponenten oder Aktivitäten verteilt.
- *Energieallokation*: Die Auswirkungen werden verteilt proportional zur Energiemenge, die von den einzelnen Komponenten oder Aktivitäten verbraucht wird.

Die Wahl der Allokationsmethode hängt von den spezifischen Anforderungen und Zielen der Ökobilanz ab und kann je nach den gegebenen Umständen variieren. Es ist wichtig, dass die Allokationsmethode transparent und nachvollziehbar ist und sich auf wissenschaftlich fundierte Annahmen und Daten stützt.

Sachbilanz (Inventar)

Nach der Definition des Ziels und der Rahmenbedingungen werden in der Sachbilanz Informationen bezüglich der Inputs von Ressourcen und Materialien und bezüglich der Outputs von Emissionen, Abfällen und Produkten zusammengetragen. Diese Zusammenstellung wird auch als *Inventar* bezeichnet. In diesem Schritt werden alle Prozesse untersucht, die als Teil des untersuchten Systems identifiziert wurden. Grundlagen für die Sachbilanz sind:

- Materialbedarf, Abfallmengen, Inanspruchnahme von Boden und Land, Maschinenstunden der Produktionsprozesse und im Bauprozess entstehende Emissionen (z. B. durch Baumaschinen).
- Daten zu den Prozessen der Produktion, Nutzung und Entsorgung bzw. zu den Verwertungsvarianten des untersuchten Systems.

- Daten zu den Prozessen der Rohstoff-/Energiegewinnung, der Herstellung, der Entsorgung oder des Transports, die von Dritten bereitgestellt werden.

Die Daten, welche für die jeweilige Studie herangezogen werden, sind idealerweise anhand von mehreren unabhängigen Quellen (Messdaten, Literaturwerte, Einschätzungen von Expertinnen) validiert. Die Material- und Ressourcenflüsse werden entsprechend dem referenzierenden Produktfluss skaliert, der aus der funktionellen Einheit bestimmt wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die Material- und Ressourcenmenge der vordefinierten funktionellen Einheit entspricht. Aufgrund der umfassenden Natur von Subprozessen in einem System, verlässt sich die Sachbilanz häufig auf generische Daten für viele Prozesse, die aus Datenbanken mit Einzelprozessen stammen. Generische Daten in der Sachbilanz beziehen sich auf allgemeine Daten, die für eine bestimmte Branche oder einen bestimmten Sektor typisch sind, anstatt spezifische Daten für ein bestimmtes Produkt oder eine bestimmte Dienstleistung zu sein. Zum Beispiel könnte eine generische Datenbank für die Sachbilanz eines PKW alle typischen Material- und Energieeinträge enthalten, die für die Herstellung und Nutzung von PKW benötigt werden, basierend auf Daten von durchschnittlichen PKW auf dem Markt.

Hintergrunddaten

Hintergrunddaten sind erforderlich, um den gesamten Lebenszyklus von Materialien und Energie im Rahmen einer Ökobilanz zu bewerten. Sie beinhalten die vor- und nachgelagerten Prozesse wie die Produktion von Rohmaterialien und Energie oder die Entsorgung. Hintergrunddaten können aus verschiedenen Quellen stammen, wie zum Beispiel aus wissenschaftlichen Studien oder Datenbanken (zu Datenbanken siehe Kapitel 3.5).

Wirkungsabschätzung

In der Phase der Wirkungsabschätzung wird anhand von dem Stand der Wissenschaft entsprechenden Wirkungsmodellen ermittelt, wie sehr das untersuchte System die Umwelt belastet. Man geht dabei von einer Reihe von allgemein akzeptierten Umweltproblemen aus – wie zum Beispiel dem Treibhauseffekt oder der Zerstörung der Ozonschicht – und zeigt mit Hilfe der Wirkungsmodelle, wie stark die dem untersuchten System zugrundeliegenden Prozesse zu diesen Umweltproblemen beitragen. Es resultiert eine mehrdimensionale Bewertung und eine Priorisierung dahingehend, welchem Umweltproblem die

grösste Relevanz für das untersuchte System zugeschrieben wird. Folgende Wirkungsmodelle werden in der vorliegenden Arbeit verwendet:

- Die Treibhausgasemissionen (Englisch GWP, Global Warming Potential)
- Der kumulierte Energieaufwand (KEA)
- Die Methode Environmental Footprint 3.1 (EF)
- Der Indikator der Umweltbelastungspunkte 2021 (UBP 2021)

Auswertung und Interpretation

Im letzten Schritt der Ökobilanzierung werden die Ergebnisse aus Sachbilanz und Wirkungsabschätzung des betrachteten Systems aufgrund der Zielsetzungen der Studie ausgewertet und interpretiert. Dies kann dazu führen, dass die im ersten Schritt festgelegten Annahmen angepasst (z. B. die Systemgrenzen oder die Auswahl der Wirkungsmodelle) oder zusätzliche Datenrecherchen durchgeführt werden müssen, falls die Qualität resultatbestimmender Daten nicht zufriedenstellend ist. Dadurch wird die Aussagekraft der Untersuchung in einem iterativen Prozess schrittweise verbessert. Zusätzlich empfiehlt es sich, eine Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse der Resultate als Teil der Interpretation durchzuführen, um mögliche Daten- oder Modellunsicherheiten zu erkennen. So kann die Robustheit der Ergebnisse bewertet und mögliche Schwachstellen der Analyse identifiziert und offengelegt werden.

Normen und Richtlinien

ISO 14040/14044: Die Internationale Organisation für Normung hat folgende Normen verfasst, um die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen sicherzustellen [9] [10]. Die Norm *ISO 14040* enthält die Grundsätze und Rahmenbedingungen von Ökobilanzen, während die Norm *ISO 14044* die Anforderungen an die Durchführung von Ökobilanzen festlegt. Beide Richtlinien zusammen definieren die vier Phasen einer Ökobilanzierung: Die *Definition des Ziels und der Rahmenbedingungen*, die *Sachbilanz*, die *Wirkungsabschätzung* und die *Interpretation*. Die beiden Normen sind komplementär und bilden zusammen ein umfassendes Regelwerk für die Durchführung von Ökobilanzen:

- Die Norm ISO 14040 legt die *allgemeinen Anforderungen* für die Durchführung von Ökobilanzen fest und beschreibt den Rahmen für die Ökobilanz sowie die wichtigsten Phasen und Schritte bei der Durchführung von Ökobilanzen.
- Die Norm ISO 14044 legt die *spezifischen Anforderungen* für die Durchführung von

Ökobilanzen fest und beschreibt die Anforderungen an die Datenqualität, die Validierung von Ökobilanzen, die Dokumentation von Ökobilanzen und die Berichterstattung.

EN 15804: Die Europäische Norm EN 15804 legt die Anforderungen an die Durchführung von *Ökobilanzen für Bauprodukte* fest [11]. Sie definiert die Anforderungen und die Vorgehensweise, wie Umweltproduktdeklarationen (EPD, Environmental Product Declaration) für Bauprodukte, Bauleistungen und Bauprozesse in einheitlicher Weise abgeleitet, verifiziert und dargestellt werden. EPD sind ein wichtiges Instrument zur Kommunikation von Ökobilanzergebnissen von Produkten im Bausektor.

EN 15643: In der Europäischen Norm EN 15643 sind die allgemeinen Rahmenbedingungen zur nachhaltigkeitsbezogenen *Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken* beschrieben [12]. Dabei wird die umweltbezogene, soziale und ökonomische Qualität bewertet und die technischen und funktionalen Eigenschaften berücksichtigt. Die Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken erfasst Aspekte und Auswirkungen von Bauwerken mittels quantitativer Indikatoren und unterteilt den Lebenszyklus in definierte Phasen (Abbildung 1).

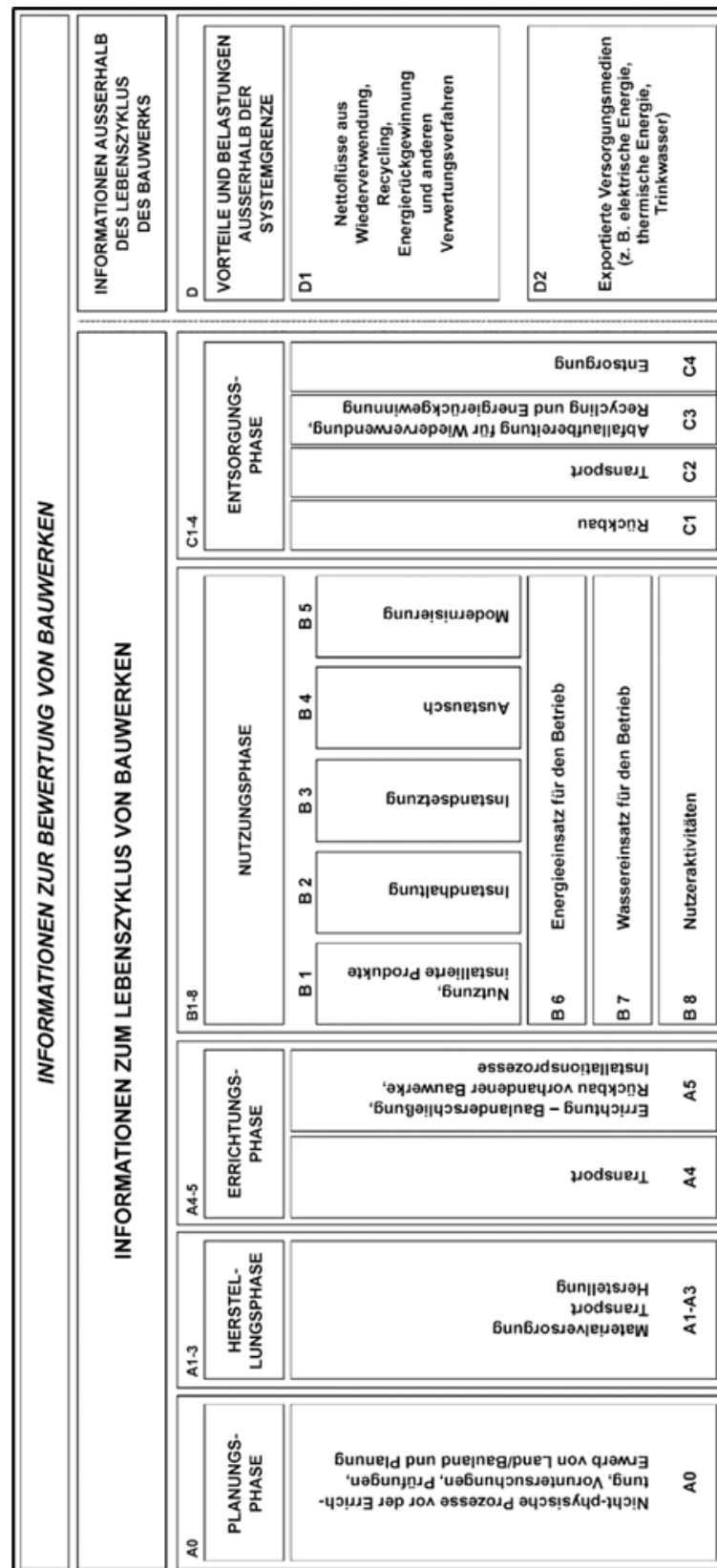


Abbildung 1: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5. [12]

3 AKTUELLE LITERATUR UND STAND DER TECHNIK

3.1 Gliederung und Einteilung

Um eine nachvollziehbare Grundlage für die nachfolgenden Festlegungen und Entwicklungen verwenden zu können, ist es sinnvoll und zweckmässig, die Literaturrecherche auf die massgebenden Fragestellungen zu beziehen. Unter Bezugnahme auf das Projektziel bzw. die Forschungsfrage von SABINA wurde die Literatur in nachfolgende Themenbereiche gegliedert:

- Normen und Richtlinien
- Forschungsberichte
- Öko-Datenbanken
- Sonstige Grundlagen und Literatur

3.2 Vorgehensweise bei der Auswahl der massgebenden Literatur

Zur Auswahl der relevanten und für das Projekt SABINA als massgebend eingestuftes Literatur wurde wie folgt vorgegangen:

1. Erstellung eines generellen Überblicks von Grundlagen und erste Auswahl unter Bezugnahme auf die definierten Themenbereiche und die Projektzielsetzung.
2. Auswahl und Auflistung der relevanten Literatur für Deutschland, Österreich und die Schweiz nach genereller Durchsicht der einzelnen Quellen und unter Bezugnahme auf die definierten Themenbereiche bzw. die Projektzielsetzung.
3. Auf der Grundlage einer weiterführenden detaillierten Durchsicht der relevanten Literatur wurden jene Grundlagen zusammenfassend aufgelistet, deren Inhalte und Vorgaben bzw. Erkenntnisse in das Projekt (direkt) zu übernehmen waren.

3.3 Normen und Richtlinien

In den nachfolgenden Kapiteln wird ein kurzer Überblick über die für das Projekt SABINA relevanten Normen und Richtlinien gegeben. Dabei wurden in erster Linie die Richtlinien aus den D-A-CH-Ländern herangezogen.

3.3.1 Bautechnische Gestaltung des Strassenoberbaus

In den D-A-CH-Ländern stehen umfassende Standards für die bauliche Gestaltung von Strassenoberbaukonstruktionen zur Verfügung, die in den jeweiligen nationalen Richtlinien veran-

kert sind. Die massgeblichen Vorgaben in **Deutschland** sind in folgenden von der FGSV (Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen) herausgegeben Richtlinien beschrieben.

- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, **RStO 499**, 2012. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2012, Korrektur 2020., Köln: FGSV-Verlag, 2020. [13]
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, **ZTV Asphalt-StB**, 2014. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, Ausgabe 2007/Fassung 2013, Köln: FGSV Verlag, 2013. [14]
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, **TL Asphalt-StB**, 2013. Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, Ausgabe 2007/Fassung 2013, Köln: FGSV Verlag, 2013. [15]
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, **ZTV Beton-StB**, 2007. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2007, Köln: FGSV Verlag, 2007. [16]
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, **TL Beton-StB**, 2007. Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, Köln: FGSV Verlag, 2007. [17]

In **Österreich** stehen ebenfalls umfassende Standards für die bauliche Gestaltung von Strassenoberbaukonstruktionen zur Verfügung, die von der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV) in Form der RVS (*Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen*) herausgegeben werden. Auch hier sind die Richtlinien nach Dimensionierung und Material- bzw. Schichtanforderungen getrennt. Die massgebenden Richtlinien sind:

- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 03.08.63**, Bautechnische Details - Oberbaubemessung. Wien, 2016/2021 [18]
- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 03.08.64**, Bautechnische Details - Oberbauverstärkung von Asphaltstraßen. Wien, 2022/2023. [19]

- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 03.08.68**, Bautechnische Details – Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen. Wien, 2019. [20]
- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 03.08.69**, Bautechnische Details – Rechnerische Dimensionierung von Betonstraßen. Wien, 2020. [21]
- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 08.97.05**, Anforderungen an Asphaltmischgut, Wien, 2019/2024. [22]
- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 08.16.01**, Anforderungen an Asphaltschichten. Wien, 2019. [23]
- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 08.17.02**, Technische Vertragsbedingungen – Betondecken - Deckenherstellung. Wien, 2024. [24]
- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 11.03.21**, Asphalt und Asphaltschichten, Prüfung und Abrechnung, Abrechnungsbeispiele. Wien, 2019. [25]

In analoger Weise definiert auch die **Schweiz** die bautechnischen Anforderungen an den Strassenoberbau und die hierfür verwendeten Materialien. Herausgegeben werden diese Richtlinien vom VSS (Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute). Die massgebenden Richtlinien sind:

- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **VSS 40320**, Dimensionierung des Strassenaufbaus; Äquivalente Verkehrslast. Zürich, 2022. [26]
- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **VSS 40324**, Dimensionierung des Strassenaufbaus; Unterbau und Oberbau. Zürich, 2019. [27]
- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **SN 640420**, Asphalt - Grundnorm. Zürich, 2015. [28]
- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **SN EN 13108**, Teil 1 bis Teil 9 Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen. Zürich, 2019 bis 2022. [29]
- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **SN 640461**, Betondecken für Verkehrsflächen - Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten. Zürich, 2014. [30]

In allen D-A-CH-Ländern zeigt sich die normative Trennung zwischen der Dimensionierung des Strassenoberbaus und den Spezifikationen und Anforderungen im Bereich der Materialien und der Schichten. Somit ist auch eine grösstmögliche Flexibilität bei der Auswahl des jeweiligen Schichtmaterials gegeben. Um diese Vorgehensweise auch im Rahmen von SABINA praxisnah abzubilden, werden die zu untersuchenden Oberbaukonstruktionen in gleicher Weise spezifiziert, wobei auf die veränderten Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien in der Lebenszyklusbetrachtung besonderer Wert gelegt wird. So sind z. B. die technischen Nutzungsdauern von unterschiedlichen Asphaltdeckschichten bei den Erhaltungsintervallen von wesentlichem Einfluss.

3.3.2 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

Bei der bautechnischen Gestaltung einer *neuen* oder einer *erneuerten* Oberbaukonstruktion spielt die Wirtschaftlichkeit eine wesentliche Rolle. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen aus Sicht der öffentlichen Hand (Auftraggeber) verfolgen den Ansatz der gesamtwirtschaftlichen Herangehensweise (Kosten-Nutzen-Analyse). Es werden unabhängig von der Möglichkeit der Monetarisierung alle positiven und negativen Kosten- und Nutzenkennwerte berücksichtigt. Die Kennwerte gehen dabei über betriebswirtschaftliche Kosten- und Nutzenvergleiche hinaus und berücksichtigen zum Teil den gesellschaftlichen Nutzen- und den Kostenanteil gleichermaßen. Grundlegend sollte beim Vergleich von Alternativen stets die Möglichkeit angestrebt werden, Nutzen und Kosten möglichst umfassend zu quantifizieren. Auch in diesem Bereich steht eine Anzahl von nationalen Richtlinien in den D-A-CH-Ländern zur Verfügung.

In **Deutschland** bilden die *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (kurz **EWS**) und ein korrespondierender *Kommentar* das gültige technische Regelwerk zur volkswirtschaftlichen Beurteilung von Strasseninfrastrukturprojekten:

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, EWS, 1997. Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen, Köln: FGSV Verlag, 1997. [31]
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, EWS, 1997. Kommentar - Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen, Köln: FGSV Verlag, 1997. [32]

Diese Regelwerke sind Nachfolger der Richtlinien zur Anlage von Straßen – Teil: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (RAS-W) aus dem Jahr 1986 bzw. der Richtlinien für wirtschaftliche Vergleichsrechnungen im Straßenwesen (**RWS**) aus dem Jahr 1970 und wurden 1997 her-

ausgegeben. Eine Überarbeitung – nun wieder als Richtlinien (RWS) – wird seit 2010 vorbereitet.

Auch im Bundesverkehrswegeplan bzw. im zugehörigen Methodenhandbuch [33] sind für die Bewertung von Infrastrukturprojekten entsprechende Grundlagen in aktueller Form zusammengestellt, die vor allem für die Modellierung im Bereich Soziales herangezogen werden können.

Status Quo der RWS ist eine Entwurfsfassung aus dem Jahr 2016 (Stand Februar 2016) und ihre Prüfung auf Anwendbarkeit in der Planungspraxis. Für beide Fassungen (1997 und 2016) gilt aber die gleiche Zielstellung, dass Variantenvergleiche und bzw. oder Dringlichkeitsuntersuchungen für Strassenbaumassnahmen in einem einheitlichen Rahmen möglich sind.

Die *Kostenkomponenten* (K), definiert als die zusätzlichen Kosten der Baulast infolge einer Strassenbauinvestition, sind gemäss den EWS gegliedert in *Investitionskosten* und *laufende Kosten*.

Investitionskosten sind die anfallenden Ausgaben zur Realisierung des Bauvorhabens. Das inkludiert auch Methoden zum Ausgleich ökologischer Folgen und Hilfsmittel zur Reduzierung bzw. Verhinderung negativer Auswirkungen (z. B. Lärmschutzwände). Laufende Kosten sind Ausgaben für allfällige Massnahmen, die der Sicherung der angestrebten Verkehrsqualität und -sicherheit dienen. Laut der Entwurfsfassung *Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* sind laufende Kosten neuerdings als Nutzen definiert. Es sind folgende Nutzenkomponenten benannt (Indizes in Klammern gesetzt): Betriebskosten (NB), Fahrzeiten (NT), Unfallgeschehen (NU), Lärmbelastung (NL), Schadstoffbelastung (NS), Klimabelastung (NC), Trennwirkung gegenüber Fussgänger-Überquerung (NZ), Flächenverfügbarkeit für Fussgänger und Radfahrer (NF) und die Veränderung der laufenden Kosten (NK). Das jeweilige Nutzen-Kosten-Verhältnis in Abhängigkeit von der jeweils betrachteten Nutzenkomponente (N_{NK}) und den Kosten eines Jahres (K_a) wird wie folgt berechnet:

$$NKV_{NK} = \frac{N_{NK}}{K_a} \quad \text{Gl. 1}$$

mit

NKV_{NK} Beitrag einer Nutzenkomponente zum Nutzen-Kosten-Verhältnis [-]

N_{NK} Nutzen der betrachteten Nutzenkomponente im betrachteten Jahr [€/a]

K_a Kosten eines Jahres [€/a]

Bei öffentlichen Bauaufträgen gilt, dass nur das wirtschaftlichste Angebot den Zuschlag für

das Bauvorhaben bekommt. Das wirtschaftlichste Angebot ist dabei nicht gleichzusetzen mit dem kostengünstigsten Angebot. Generell darf einem Angebot mit einem unangemessen hohen oder niedrigen Preis kein Zuschlag erteilt werden. Das Angebot, welches unter Berücksichtigung aller Kriterien (bspw. Qualität, Preis, Betriebs- und Folgekosten, Zweckmässigkeit, Ästhetik) als das wirtschaftlichste erscheint, erhält den Zuschlag bzw. den Auftrag zur Durchführung der Baumassnahme (§ 16d VOB/A, 2017). Entsprechend sind von Auftragnehmerinnenseite - respektive Bewerberinnenseite - auch Vorüberlegungen zur wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit des eigenen Angebotes vorzunehmen. Grundsätzlich sind die Entscheidungen von einzelwirtschaftlichen Aspekten geprägt. Volkswirtschaftliche Beurteilungen und Bewertungen spielen in den meisten Fällen bei Ausschreibungen nur mehr eine sehr untergeordnete Rolle. Im Entscheidungsprozess für oder gegen eine bestimmte Variante sollten sie jedoch unbedingt berücksichtigt werden.

Für die entsprechende Abwägung von Investitionsentscheidungen stehen der Bauwirtschaft zahlreiche Verfahren aus der Betriebswirtschaft zur Verfügung (siehe Tabelle 2).

Primär wird bei Investitionsentscheidungen zwischen *statischen* und *dynamischen* Verfahren separiert. Der Zweck ist der gleiche. Es gilt, die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit einer Investition zu dokumentieren.

Statische Verfahren sind dadurch charakterisiert, dass Erlöse und Kosten gleichmässig über die Nutzungsdauer (1 bis 2 Perioden) verteilt sind. Anwendung findet diese Art der Verfahren, wenn schnelle und vorläufige Schätzungen nötig sind. Auch bei unsicherer Daten- bzw. Informationslage kommen vorzugsweise statische Verfahren zum Einsatz.

Bei der *dynamischen Investitionsrechnung* werden in gleicher Weise wie bei den statischen Verfahren zunächst die Ein- und Auszahlungsströme der Investitionsobjekte differenziert und für jede einzelne Periode bis zum Ende der Nutzungsdauer erfasst und bewertet. Darüber hinaus werden aber bei den dynamischen Verfahren die Zinseffekte mit in der Rechnung berücksichtigt (Indexierung). Generell gilt für jegliche Investitionsverfahren, dass mit zunehmender zeitlicher Reichweite die Aussagekraft der Prognose immer unsicherer wird.

Tabelle 2 Verfahren der Investitionsrechnung

Verfahren der Investitionsrechnung	
Statische Verfahren	Dynamische Verfahren
Kostenvergleichsrechnung	Kapitalwertmethode
Gewinnvergleichsrechnung	Interne-Zinsfuß-Methode
Rentabilitätsrechnung	Annuitätenmethode
Amortisationsrechnung	[-]

Auch in **Österreich** wurde bereits vor mehr als zwei Jahrzehnten eine speziell für die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Oberbaukonstruktionen anzuwendende Richtlinie erstellt, die bis heute gültig ist (wird derzeit von FSV überarbeitet und an aktuelle Vorgaben angepasst):

- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr,
RVS 03.08.71, Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Oberbaukonstruktionen im Straßenbau. Wien, 2001. [34]

Neben der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit aus der Sicht des Baulastträgers (Abbildung 2) enthalten die RVS 03.08.71 [34] auch Empfehlungen für die Berechnung von Kosten für Strassennutzerinnen in Form von Zeitkosten, Fahrzeugbetriebskosten und Unfallfolgekosten. Als methodische Grundlage wird auf die Kapitalwertmethode verwiesen.

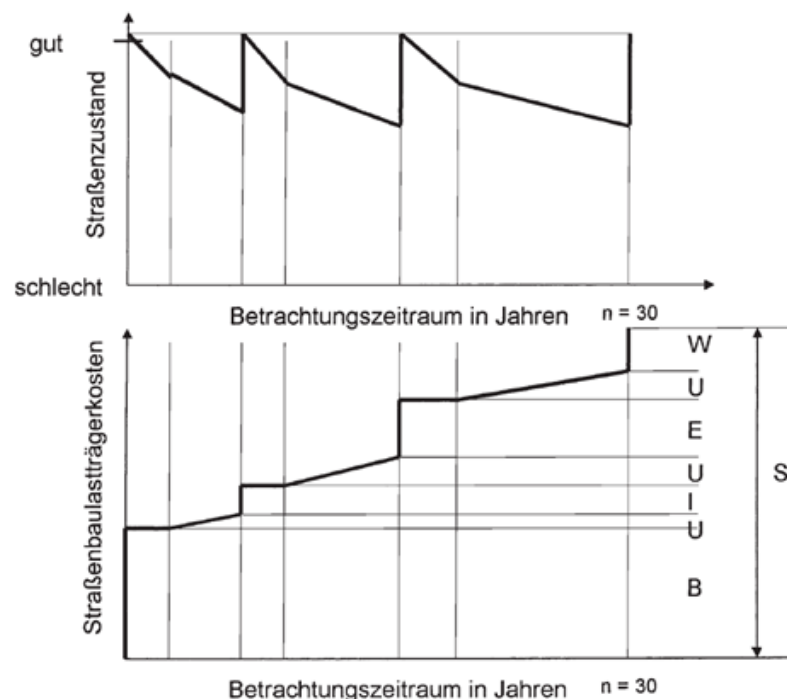


Abbildung 2: Beispiel für die Strassenzustandsentwicklung während 30 Jahren abhängig von den Ausgaben der Strassenbaulastträgerin [34]

Ein wesentliches Ziel der Bearbeitung besteht dabei in der Anpassung an die aktuellen RVS-Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsbewertung von Ingenieurbauwerken:

- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 13.05.11**, Lebenszykluskostenermittlung für Brücken. Wien, 2017/2024. [35]

Speziell für die Bewertung des Vermögens einer Strassenoberbaukonstruktion werden hier aus Gründen der Vollständigkeit noch folgende zwei österreichische Richtlinien bzw. Normen erwähnt:

- Um eine vereinheitlichte Vermögensbewertung zu ermöglichen, wurde das Merkblatt **RVS 13.05.31** [36] entwickelt, welches derzeit als Entwurf vorliegt. Es kann für alle zu behandelten Anlagenarten herangezogen werden und beinhaltet neben einer detaillierten Auflistung der massgebenden Begriffe auch eine Beschreibung der zustandsabhängigen Ermittlung des Anlagevermögens.
- Die *Voranschlags- und Rechnungsabschlussverordnung* **VRV 2015** [37] liefert umfassende Vorgaben für eine Vermögensbewertung vor dem Hintergrund der Einführung der doppelten Buchhaltung.

Unter Heranziehung der **Schweizer** Richtlinie SN 641820 ist es möglich, eine auf der Kosten-Nutzen-Analyse basierende Bewertung von Strassen vorzunehmen:

- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **SN 641820**, Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr; Grundnorm. Zürich, 2022. [38]

Diese Richtlinie bietet eine klare methodische Struktur und Leitlinien, um Verkehrsprojekte in der Schweiz auf ihre wirtschaftliche Rentabilität hin zu prüfen. Die Anwendung dieser Richtlinie erleichtert die Entscheidungsfindung und soll sicherstellen, dass öffentliche Gelder effizient eingesetzt werden. Mit der SN 641820 haben Planerinnen und Entscheidungsträgerinnen ein Instrument zur Hand, um Verkehrsinfrastrukturprojekte objektiv zu bewerten und sicherzustellen, dass sie den Bedürfnissen der Gesellschaft entsprechen.

3.3.3 Planung von Erhaltungsmassnahmen

Neben der bautechnischen Gestaltung des Strassenoberbaus im Rahmen der Errichtung bzw. der Erneuerung sind es die Erhaltungsmassnahmen, die einer detaillierten Planung bedürfen. Da es sich fast immer um eine Planung an einem Bestandsoberbau handelt, müssen hierfür auch die notwendigen Informationen gesammelt und einer Bewertung unterzogen werden. Die

hierfür massgebenden nationalen Normen und Richtlinien sind nachfolgend im Überblick zusammengestellt.

Für **Deutschland** sind hierfür die *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen* das zentrale Dokument:

- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, **RPE-Stra 01**, Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen, Köln: FGSV Verlag, 2001. [39]

Die RPE-Stra 01 [39] umfasst neben der Planung und Durchführung von Erhaltungsmassnahmen auch die vorab durchzuführende Methodik zur Zustandserfassung und Bewertung (ZEB). Sie enthält eine vollständige Zusammenstellung aller relevanten Regelwerke (Anhang 3 der Richtlinie), sowie weitere Angaben zu Teilaspekten der Erhaltungsplanung inklusive geltender Regelwerke.

Die Erfassung und Bewertung des Oberflächenzustandes erfolgt im Regelfall gemäss den einschlägigen Arbeitspapieren der FGSV für die *Zustandserfassung und -bewertung* (ZEB). Die FGSV hat weiterhin die *Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen* herausgegeben:

- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, **ZTV ZEB-StB**, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen. Köln, 2006/2018. [40]

Ein geänderter und korrigierter Nachdruck 2018 ist unter Berücksichtigung des Allgemeinen Rundschreibens des Ministers BMV ARS 6/2018 erhältlich. Die ZTV ZEB-StB behandeln die Vorbereitung, Durchführung, Auswertung, Bewertung und Qualitätssicherung der Zustandserfassung mit schnell fahrenden Messfahrzeugen und sie beinhalten die technischen Erfassungs- und Auswerteregeln für die messtechnische Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) von Fahrbahnen. Die ZTV ZEB-StB basieren auf den Erfahrungen aus den langjährigen messtechnischen Zustandserfassungen auf den Bundesfernstrassen. Auf die Besonderheiten der Zustandserfassung und -bewertung in Ortsdurchfahrten wird hingewiesen.

Weitere zentrale Dokumente sind die aus dem Jahr 2019 stammenden *Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung* – AP 9 [41], die in Abhängigkeit der unterschiedlichen Aspekte wie folgt gegliedert sind:

- ZEB Zustandserfassung und -bewertung
 - Reihe A - Auswertung
 - FGSV AP 9/A 1 A 1 Zustandsbewertung
 - Zustandsbewertung bei messtechnischer Erfassung
 - Zustandsbewertung bei visueller Erfassung
 - Veranschaulichung und statistische Aufbereitung von Zustandsdaten
 - FGSV AP 9/A 2 A 2 Datenorganisation und Historisierung
 - Reihe M - Hinweise zur Sammlung und Organisation von Zustandsdaten
 - Grundsätze der Historisierung von Zustandsdaten
 - Messtechnische Zustandserfassung von Strassen mit schnell fahrenden Messsystemen
- Erhaltungsplanung
 - Reihe R - Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen
 - R 1 Standardwerte der Programmkenngrossen
 - R 2 Anforderungen an die Eingangsdaten
 - R 3 Ermittlung der Kostendaten
 - Reihe S - Substanzwert
 - Substanzwert (Bestand)

Flankiert werden die RPE-Stra 01 [39] und die Arbeitspapiere von folgenden Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien:

- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, **ZTV BEA-StB**, 2013. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen - Asphaltbauweisen, Köln: FGSV Verlag, 2013. [42]
- FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, **ZTV BEB-StB**, 2015. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen - Betonbauweisen, Köln: FGSV Verlag, 2015. [43]

Auch in **Österreich** liegen für die Erhaltungsplanung entsprechende Richtlinien und Normen vor, wobei es (im Gegensatz zu Deutschland und der Schweiz) keine übergeordnete Richtlinie bzw. Norm für die grundlegende Erhaltungsplanung gibt. Diese Aufgabe erfüllt das *Handbuch*

Pavement Management in Österreich [44] (in der jeweils aktuellen Fassung). Es liefert wesentliche Informationen für die Gliederung und Verwaltung der Inventardaten des Strassenoberbaus und beschreibt die massgebenden Belastungen und Beanspruchungen inklusive der hierfür verwendeten Daten. Auch im Bereich der Lebenszyklusbewertung und -analyse (aus bautechnischer bzw. wirtschaftlicher Sicht) ist dieses Handbuch *die* aktuelle Grundlage für den Strassenoberbau. Neben den Verfahrensbeschreibungen beinhaltet das Handbuch auch die Vorgaben der Zustandsprognose, eine umfassende Beschreibung des Massnahmenkatalogs sowie der notwendigen Analysen (Wirtschaftlichkeitsuntersuchung) für die Auswahl einer optimalen Erhaltungsstrategie.

Für die Zustandserfassung und -bewertung der österreichischen Bundesstrassen können die beiden nachfolgenden RVS-Richtlinien herangezogen werden:

- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 13.01.15**, Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR. Wien, 2022. [45]
- FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, **RVS 13.01.16**, Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken. Wien, 2022. [46]

Sämtliche Details im Hinblick auf die Anforderungen an die Messverfahren, Messgeräte, etc. können der **RVS-Reihe 11.06.60** (Fahrbahnoberfläche) entnommen werden, darunter auch die Details für die Messungen mit dem System RoadSTAR, welches das Standardsystem zur schnellfahrenden Zustandserfassung am ASFINAG-Netz darstellt. Hinweise zur bautechnischen Umsetzung von Erhaltungsmassnahmen sind für Asphaltstrassen in den **RVS 13.01.41** [47] und für Betonstrassen in den **RVS 13.01.51** [48] enthalten.

Auf eine sehr umfassende Richtliniengrundlage im Bereich Planung von Erhaltungsmassnahmen kann in der **Schweiz** zurückgegriffen werden. Neben den vom VSS herausgegeben Richtlinien spielen dabei auch die Vorgaben des ASTRA eine wesentliche Rolle. Die wesentlichen Richtlinien im Bereich der übergeordneten (strategischen) Erhaltungsplanung sind dabei:

- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **SN 640900**, Erhaltungsmanagement (EM) – Grundnorm, inklusive Anhang Begriffssystematik. Zürich, 2022. [49]

- ASTRA Richtlinie, Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen – Planung und Durchführung des Unterhalts, Art. Nr. 308 103.d. Bundesamt für Strassen ASTRA. Bern, 2002 [50]
- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **VSS 40931**, Erhaltungsmanagement – Erhaltungsstrategien für Fahrbahnen. Zürich, 2019. [51]
- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **SN 640907**, Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement von Strassen. Zürich, 2013. [52]

Die Abbildung 3 aus der Richtlinie VSS 40730B [53] gibt einen guten Überblick über die Gliederung und Struktur bzw. die Anwendungsbereiche der unterschiedlichen VSS-Richtlinien für die Wahl und Planung sowie die Projektierung der Erhaltungsmaßnahmen in Abhängigkeit von der Bauweise (Asphaltbauweise «bitumenhaltige Beläge», Betonbauweise «Betonbeläge»).

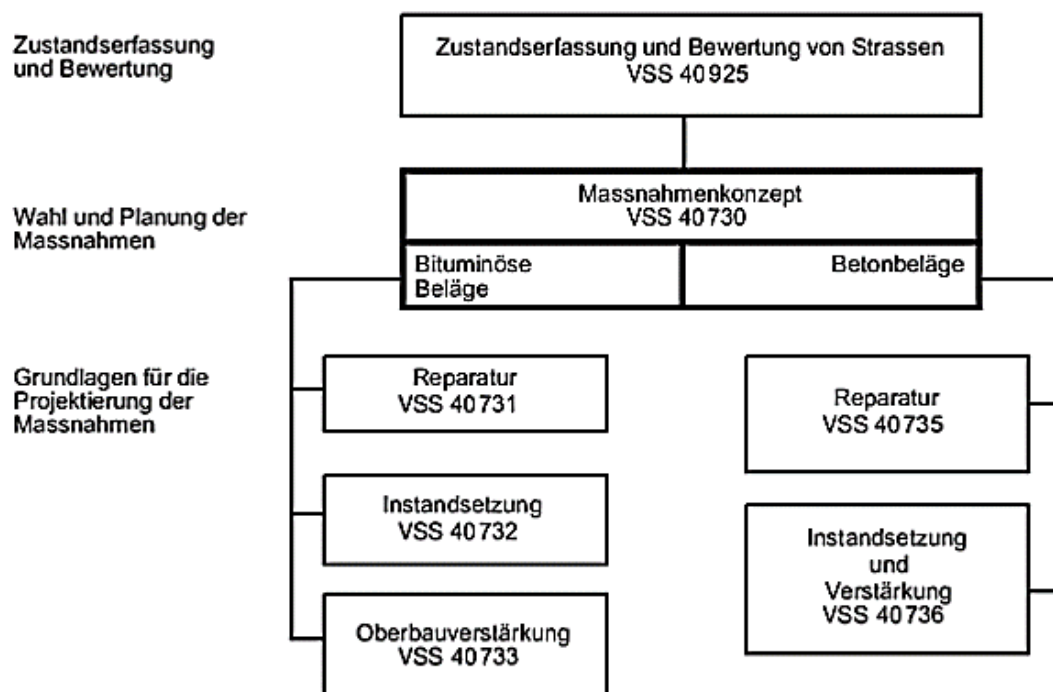


Abbildung 3: VSS-Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen [53]

Speziell für die Zustandserfassung, die Berechnung der Indikatoren und Indizes sind folgende Richtlinien massgebend:

- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **VSS 40925B**, Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Zustandserhebung und Indexbewertung. Zürich, 2019. [54]
- VSS – Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, **VSS 40926**, Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Visuelle Zustandserhebung: Einzelindizes. Zürich, 2019. [55]

3.3.4 Ökobilanzierung (Lebenszyklusbewertung)

Die generelle Vorgehensweise zur Lebenszyklusbewertung mittels einer Ökobilanzierung basiert in den D-A-CH-Ländern auf den internationalen Normen **ISO 14040** [9] und **14044** [10].

Die nachstehende Abbildung 4 fasst die vier Schritte der Ökobilanzierung gemäss ISO 14'040:2006 [9] zusammen.¹

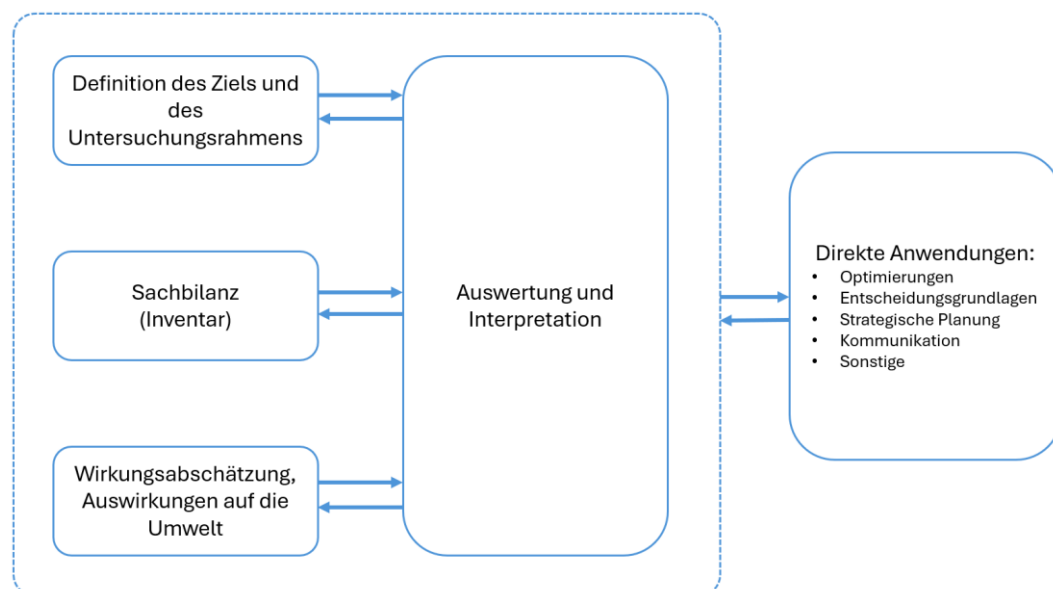


Abbildung 4: Schritte der Ökobilanzierung nach ISO 14040ff. Das Vorgehen zwischen den einzelnen Schritten ist iterativ. [9]

Weiterhin findet die deutsche Umsetzung der Europäischen Norm **EN 15804** [56] bezüglich der Anforderungen an die Durchführung von Ökobilanzen für Bauprodukte Anwendung. Sie definiert die Anforderungen und die Vorgehensweise, wie Umweltproduktdeklarationen

¹ Der Begriff *Lebenszyklusanalyse* wird vor dem Hintergrund einer ökologischen Bewertung in den meisten Fällen mit dem Begriff *Ökobilanz* gleichgesetzt. Da der Begriff *Lebenszyklusanalyse* auch bei einer wirtschaftlichen Bewertung seit vielen Jahren Anwendung findet, ergeben sich häufig Missverständnisse, sodass im gegenständlichen Bericht entweder von Ökobilanz oder von Lebenszyklusanalyse und im ökonomischen Bereich von Lebenszykluskostenanalyse gesprochen wird.

(EPDs) für Bauprodukte, Bauleistungen und Bauprozesse in einheitlicher Weise abgeleitet, verifiziert und dargestellt werden sollen. Die EPDs sind ein wichtiges Instrument zur Kommunikation von Ökobilanzergebnissen von Produkten im Bausektor (vgl. Kapitel 2.2).

Die Rahmenbedingungen gemäss den gängigen europäischen Normen zur Nachhaltigkeit von Bauwerken **EN 15643** [12] und **EN 15804** [56] lassen sich nicht vollumfänglich für ein Strassenbauwerk übernehmen. Projektspezifische Aspekte machen es notwendig, die Informationsmodule zur Nachhaltigkeitsbewertung anzupassen und einzugrenzen.

Im Prozess des nachhaltigen Bauens optimieren Planerinnen die Umweltwirkungen eines Bauwerks über dessen gesamten Lebensweg. Sie wählen die Gebäudeform, das Energiesystem und die Baumaterialien vom Tragwerk bis zum Ausbau. Viele dieser Entscheidungen werden aufgrund von Erfahrungen qualitativ getroffen (z. B. Wahl einer möglichst kompakten Gebäudeform). Die Optimierung kann durch Messgrössen unterstützt werden, mit denen man die Varianten quantitativ bewertet. Dazu werden meist Ökobilanzen eingesetzt. Sie sind in vielen Standards und Beurteilungssystemen zum nachhaltigen Bauen integriert, meist zur Berechnung der grauen Energie zur Bewertung von Bauwerken, Bauteilen oder Baustoffen. Seit einigen Jahren werden neben der grauen Energie auch andere Bewertungskriterien betrachtet, vor allem die Treibhausgasemissionen.

Es gibt zahlreiche Ökobilanzstudien und Instrumente zur Berechnung von Ökobilanzen für Baustoffe, Bauteile und Bauwerke. Worauf sollte man bei der Suche nach den *richtigen* Instrumenten und Informationen achten?

- Die Sachbilanz sollte möglichst nachvollziehbar und durch Expertinnen geprüft sein: Die Ergebnisse einer Ökobilanz hängen oft von den zugrunde gelegten Annahmen ab. In der praktischen Anwendung sollte man schnell erkennen können, ob Ökobilanzen vergleichbar aufgebaut sind und wo relevante Unterschiede liegen. Dabei helfen einheitliche Regeln der Ökobilanzierung, einheitliche Datenformate der Hintergrunddaten (z. B. Ecoinvent), eine Prüfung durch unabhängige Gutachterinnen oder eine vollständige Veröffentlichung der grundlegenden Daten und Annahmen. Hierbei müssen die Interessen der beteiligten Unternehmen in Bezug auf die Geheimhaltung von Produktions- und Produktdaten berücksichtigt werden.
- Die Wirkungsmodelle sollten möglichst relevant und anerkannt sein: Wirkungsmodelle zielen darauf ab, die Umweltwirkungen unterschiedlicher technischer und gesellschaft-

licher Prozesse zu vergleichen. Dazu wird das Expertinnenwissen über Umweltwirkungen stark vereinfacht und es fließen auch subjektive Wertmassstäbe ein. Daher werden Wirkungsmodelle in der Fachwelt kontrovers diskutiert. In der praktischen Anwendung zählt vor allem, dass man die wichtigsten Umweltwirkungen des eigenen Produkts/Prozesses berücksichtigt und das Ergebnis von den relevanten Anspruchsgruppen anerkannt wird (z. B. den Kundinnen). Daher arbeitet man meistens mit mehreren Wirkungsmodellen parallel.

- Die Ökobilanzen sollen möglichst einfach und (trotzdem) vollständig sein: Ökobilanzen liefern Entscheidungsgrundlagen für die Planung und Projektierung von Bauwerken und die Optimierung von Bauprozessen. Dafür steht oft wenig Zeit zur Verfügung. Sie sollten daher weitgehend auf bereits vorhandenen Daten aufbauen können, z. B. auf Mengenangaben der wichtigsten Baumaterialien. Und ihre Ergebnisse sollten möglichst klar verständliche Aussagen ermöglichen, wie beispielsweise «Variante A ist ökologisch besser als Variante B». Dafür kann man auf ein einzelnes Wirkungsmodell fokussieren, wie beispielsweise die Treibhausgasemissionen. In der Entwicklung von Ökobilanzen im Baubereich wurden in den letzten zehn Jahren sehr grosse Fortschritte erzielt. Sie sind eine anerkannte Methode zur Bewertung von Baustoffen, Bauteilen und Bauwerken. Der heute verfügbare Datenbestand ermöglicht viele Anwendungen im Bauwesen. Dabei ist aber das Wissen von Baufachleuten zwingend notwendig, um sinnvolle Annahmen zu treffen und die geeigneten Daten auszuwählen.

3.4 Forschungsberichte

Ein integrativer Bestandteil von Nachhaltigkeitsüberlegungen im Verkehrswegebau ist der Strassenoberbau, als ein wesentlicher Anlagenteil der Verkehrsinfrastruktur. Für die Nachhaltigkeitsbewertung in der Praxis ist es sinnvoll und zweckmässig, die Vorgaben so weit zu präzisieren, dass für jede zu beurteilende Lösung (Oberbautyp, Materialauswahl, Erhaltungsstrategie, etc.) eine Aussage und gegebenenfalls ein Vergleich mit ein oder mehreren Varianten des Strassenoberbaus möglich ist. Dabei kann in den D-A-CH-Ländern auf solide Grundlagen zur Nachhaltigkeitsbewertung zurückgegriffen werden, die auch für das Projekt SABINA massgebend sind.

In der vergangenen Dekade haben die wissenschaftlich fundierte Bewertung und Beurteilung der Nachhaltigkeit von strassenbautechnischen Lösungen einen zunehmend hohen Stellenwert eingenommen. Vor allem bei der Entwicklung von neuen Lösungen ist eine holistische

Herangehensweise bei der Beurteilung und Bewertung der Nachhaltigkeit von zentraler Bedeutung. Diesbezüglich kann heute auf eine gute Basisliteratur zurückgegriffen werden. Die nachfolgend beschriebenen Referenzen dienen als Grundlagen für das Projekt SABINA und zur Definition der Randbedingungen, der Eingangsgrößen und des Bewertungsrahmens.

In **Deutschland** ist *nachhaltiges Denken und Handeln* seit 2010 im Rahmen des vom Bundesverkehrsministerium und der Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) gemeinsam entwickelten Forschungsprogramms *Die Straße im 21. Jahrhundert – Innovativer Straßenbau in Deutschland* verankert. Im thematischen Schwerpunkt *Die nachhaltige Straße* wird angestrebt, im Jahre 2030 u. a. eine vollständige Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten in der Projektplanung zu erreichen. Auf Basis von vorhergehenden Forschungsansätzen bezüglich der Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturprojekte im Hinblick auf Nachhaltigkeit (konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Strasseninfrastruktur siehe [57] und [58]) wurden verschiedene Verfahren der Nachhaltigkeitsbewertung für die Strassenverkehrsinfrastruktur entwickelt und zu grossen Teilen in 2016 veröffentlicht, siehe [59] und [60]. Im Bericht der BASt, Heft S97 *Einheitliche Bewertungskriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit - Straße und Tunnel* [59], ist die Systematik der Nachhaltigkeitsbewertung für die Strasse (freie Strecke) aufgestellt. Die Systematik umfasst 28 einzelne Kriterien, die den fünf Hauptkriterien-gruppen *Ökologische Qualität*, *Ökonomische Qualität*, *Soziokulturelle und Funktionale Qualität* sowie *Technische Qualität* und *Prozessqualität* zugeordnet sind.

Die Bundesregierung intensiviert die *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*⁽²⁾, deren Ziele sich u. a. auch im *Klimaschutzplan 2050*⁽³⁾ von 2016 und im *Ressourceneffizienzprogramm Pro-gress*⁽⁴⁾ von 2012 wiederfinden. Der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet der Nachhaltigkeit liegt auf der ökologischen Qualität und speziell auf den vier ökologischen Kriterien *Treibhauspotenzial*, *erneuerbarer und nicht erneuerbarer Energieverbrauch* sowie *Ressourcenschonung*.

In **Österreich** erfolgte erstmals eine vereinfachte Nachhaltigkeitsanalyse im Strassenbau – allerdings unter Berücksichtigung aller drei Säulen der Nachhaltigkeit *Ökonomie*, *Ökologie* und *Soziales* – im Rahmen des VIF-Forschungsprojekts **KOMBAS** (Kombinierte Bauweise Beton

² <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-318846>

³ <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-klimaschutzplan-2050.html>

⁴ <https://www.bmuv.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/ressourceneffizienz/deutsches-ressourceneffizienzprogramm>

– Asphalt) [61]. Im Zuge der Lebenszyklusanalyse für Bauvarianten wurden folgende Schwerpunkte gesetzt:

- Wirtschaftliche Beurteilung im Rahmen einer Lebenszykluskostenanalyse,
- ökologische Bewertung im Rahmen einer vereinfachten Ökobilanzierung unter Heranziehung des GWP (Global Warming Potential)
- und Vergleich der Verkehrsbeeinträchtigung während der gesamten technischen Nutzungsdauer. Die Behandlung dieses letzten Aspekts im Rahmen von KOMBAS ist neuartig und daher für SABINA besonders interessant.

Als thematisch relevante, **länderübergreifende Forschung in den D-A-CH-Ländern** ist das VIF-DACH Forschungsprojekt TAniA – *Technische Anlagenbewertung im Asset-Management* [1] zu nennen, mit dem für die D-A-CH-Länder eine einheitliche Grundlage für die Bewertung des Strassenoberbaus im Rahmen einer Lebenszyklusbetrachtung geschaffen wurde. Als Ergebnis von TAniA steht ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung eines zustandsbasierten technischen Anlagenwertes sowie eines Erneuerungswertes von Anlagen der Strasseninfrastruktur im Rahmen einer nachhaltigen Lebenszyklusbetrachtung zur Verfügung. Es kann in der Praxis als Grundlage für den technischen und strategischen Entscheidungsprozess zur Abschätzung herangezogen werden und zur Steuerung des Erhaltungsbedarfs unter Berücksichtigung bestimmter Zielwerte, der massgebenden Zustandsindikatoren und der massgebenden Einflussparameter. Die Berechnung des technischen Anlagenwertes zum jeweiligen Stichtag sowie in Abhängigkeit vom Zustand bzw. von der Zustandsentwicklung und von möglichen Erhaltungsmassnahmen (Lebenszyklus und Erhaltungsmassnahmenstrategien) kann für Strassenbefestigungen, Brücken und Tunnel (baulich-konstruktiv sowie E&M-Ausrüstung) erfolgen.

Ein besonderes Merkmal des Projekts SABINA ist die Berücksichtigung der sozialen Komponente der Nachhaltigkeit, genauer von möglichen Auswirkungen von baulichen Massnahmen an der Strasseninfrastruktur auf die Gesellschaft (z. B. Verzögerungen im Verkehrsablauf, Lärm, Abgase). Dabei kann im Ansatz auf die umfassende ISABELA-Studie zurückgegriffen werden (nachfolgend erläutert).

Im transnationalen europäischen CEDR-Projekt **ISABELA** - *Integration von sozialen Aspekten und Nutzen in das Lebenszyklus-Asset-Management* [62] wurde eine Grundlage für die Bewertung von sozialen Auswirkungen im Kontext der baulichen Strassenerhaltung erarbeitet. Dabei wurden soziale Leistungskennzahlen definiert, um in der Lebenszyklusbewertung auch

Erhaltungsaspekte wie Verfügbarkeit und Effizienz (Reisezeit, Fahrzeugbetriebskosten, usw.), Verkehrssicherheit (tödliche und schwere Unfälle im Zusammenhang mit dem Anlagenzustand), Umwelt (Lärm, Luftverschmutzung, natürliche Ressourcen usw.) und sozio-ökonomische Faktoren (Vermögenswert, weitere soziale Auswirkungen, usw.) berücksichtigen zu können. Es wurde erkannt, dass für die Beurteilung der Wirkungen von Erhaltungsmaßnahmen auf die Nutzerinnen der Strasseninfrastruktur der Zusammenhang zwischen dem Zustand einer Fahrbahnoberfläche und dem damit verbundenen (zusätzlichen) Energie- bzw. Treibstoffverbrauch von wesentlicher Bedeutung ist. Grundlagen hierzu enthält z. B. auch der von der FHWA (U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration) erstellte Bericht NCHRP Report 720 - *Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs* aus dem Jahr 2012 [63].

3.5 Öko-Datenbanken

Von zentraler Bedeutung für die Ökobilanzierung sind die den Berechnungen zugrundeliegenden Öko-Datenbanken, welche die entsprechenden Kennzahlen (z. B. GWP) zu den Materialien bzw. Prozessen beinhalten. Im Projekt SABINA werden die Öko-Datenbanken *Ecoinvent* für Deutschland und Österreich und die *UVEK-Datenbank* für die Schweiz genutzt (siehe Kapitel 7.4).

3.6 Sonstige Grundlagen und Literatur

Weitere relevante Grundlagen und Literatur können der nachfolgenden Liste entnommen werden:

- Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 15643: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2021. [64]
- C. Falter, T. Kessel, J. Pasderski, T. Pohl und M. P. Wistuba, *Road to Sustainability - Offenlegung ökologischer Potentiale im Straßenbau*, Straße und Autobahn, Nr. 73, pp. 390 - 394, Mai 2022. [65]
- Deutsches Institut für Normung e. V., *DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2020. [56]
- Bundesamt für Justiz, *Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG: Gesetz zu Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen*, Berlin: Bundesamt für Justiz, 2012. [66]

- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, *ÖKOBAUDAT - Sustainable Construction Information Portal*, Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Berlin, 2021. [67]

Speziell zu Indikatoren der sozialen Nachhaltigkeit gibt es im Verkehrsbereich kaum Literatur. Stattdessen könnten folgende Quellen aus dem allgemeinen Bausektor hilfreich sein:

- Ya Hong Dong und S. Thomas: A social life cycle assessment model for building construction in Hong Kong. *International Journal Life Cycle Assess*, 2015 [68]
- Xiaoyan Zheng, Said M. Easa, Zhengxian Yang, Tao Ji, Zhenliang Jiang, 2019. Life-cycle sustainability assessment of pavement maintenance alternatives: Methodology and case study, 2018 [69]
- UNEP United Nations Environmental Program: Guidelines for social life cycle assessment of products. Mailand, 2009 [70]

3.7 Zusammenfassung der relevanten Grundlagen

Tabelle 3 fasst die für das Projekt SABINA relevanten Grundlagen zusammen. Einige dieser Grundlagen sind direkt für die Fragestellungen von SABINA anwendbar, insbesondere zur Entwicklung der Berechnungs- und Bewertungsalgorithmen, andere liefern zusätzliche Informationen, die als Erläuterung bzw. Erklärung berücksichtigt werden können.

Tabelle 3: Relevante Literatur für das Projekt SABINA

Literatur / Quelle	Oberbau (Bau- und Erhaltung)	Lebens- zyklus-de- finition	Ökonomie	Ökologie	Soziale Bewertung
RStO 499, 2012. [13]	●	-	-	-	-
ZTV Asphalt-StB, 2014. [14]	●	-	-	-	-
ZTV Beton-StB, 2007. [16]	●	-	-	-	-
RVS 03.08.63, 2016/2022 [18]	●	-	-	-	-
RVS 08.97.05, 2019/2024. [22]	●	-	-	-	-
RVS 08.16.01, 2019/2024. [23]	●	-	-	-	-
RVS 08.17.02, 2024. [24]	●	-	-	-	-
VSS 40320, 2022. [26]	●	-	-	-	-
VSS 40324, 2019. [27]	●	-	-	-	-
SN EN 13108, Teil 1 bis Teil 9, 2019 bis 2022. [29]	●	-	-	-	-
SN 640461, 2014. [30]	●	-	-	-	-
EWS, 1997. [31]	-	-	○	-	-
RVS 13.05.11, 2017/2024. [35]	-	-	●	-	-
RVS 03.08.71, 2001. [34]	-	-	○	-	-
SN 641820, 2019. [38]	-	-	●	-	-
RPE-Stra 01, 2001. [39]	●	●	-	-	-
ZTV BEA-StB, 2013. [42]	○	-	-	-	-
ZTV BEB-StB, 2015. [43]	○	-	-	-	-
Handbuch Pavement Management in Österreich [44]	●	●	●	-	-
SN 640900, 2022. [49]	-	○	○	-	-
ASTRA Richtlinie, Art. Nr. 308 103., 2002 [50]	-	●	●	-	-
VSS 40931, 2019. [51]	-	●	●	-	-
SN 640907, 2013. [52]	-	-	●	-	-
EN 15804 (DIN EN 15084) [11]	-	-	-	●	-
EN 15643 [12]	-	-	-	●	-
ISO 14040 [9]	-	-	-	●	-
ISO 14044 [10]	-	-	-	●	-
TAniA [1]	-	●	●	-	-
KOMBAS [61]	●	●	●	●	●
ISABELA [62]	-	-	-	○	○
NCHRP Report 720. [63]	-	-	-	●	○

- ... hohe Relevanz, Berücksichtigung im Algorithmus
○mittlere Relevanz, Verwendung als Zusatzinformation

4 UNTERSUCHUNGSRAHMEN UND EINFLUSSFAKTOREN

4.1 Untersuchungsrahmen

4.1.1 Beschreibung des Untersuchungsgegenstands

Strassenbauweisen für Hochleistungsstrassen werden auf ihre ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit untersucht. Dies umfasst Bundesfernstrassen in Deutschland, Bundesstrassen in Österreich (Autobahnen und Schnellstrassen) und das ASTRA Netz der Schweiz und den auf diesen Strassen errichteten bzw. neu zu errichtenden Strassenoberbau. Dabei ist es besonders wichtig, eine genaue Abgrenzung des Untersuchungsrahmens vorzunehmen, was bedeutet, dass bestimmte Bereiche und Aspekte im Zuge einer Nachhaltigkeitsanalyse behandelt werden, hingegen andere Bereiche ausser Acht gelassen werden können. Eine Nichtberücksichtigung bestimmter Bewertungsbereiche wird natürlich entsprechend begründet. Da SABINA grundsätzlich für Vergleichsrechnungen herangezogen werden soll, ist es wichtig, dass bei Vergleichen immer der gleiche Untersuchungsrahmen für den entsprechenden Untersuchungsgegenstand, den Strassenoberbau, herangezogen wird. Ist dies nicht der Fall, können die Ergebnisse nicht objektiv miteinander verglichen werden.

4.1.2 Technischer Geltungsbereich

Der technische Geltungsbereich umfasst den gesamten Lebenszyklus gemäss Europäischer Norm EN 15643-5. Dieser beinhaltet die Herstellungsphase der Baustoffe (Module A1 bis A3), die Errichtungsphase des Bauwerks (Module A4 und A5), die Nutzungsphase des Bauwerks (Module B1 bis B4) sowie die Entsorgungsphase (Module C1 bis C4) einer definierten Strassenbauweise. Es werden keine Vorteile und Belastungen (Modul D) ausserhalb der Systemgrenzen berücksichtigt. In jeder Phase werden all jene Parameter eruiert, die einen relevanten Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Strassenbauweise hinsichtlich der betrachteten Wirkungsabschätzungsmethoden haben könnten. Die Abbildung 5 zeigt den *Technischen Geltungsbereich* in schematischer Form.

Die in dieser Grafik dargestellten Phasen, zeigen den gesamten Lebenszyklus, wobei Umfang und Intensität von Instandhaltung bzw. Instandsetzung massgebend von der Nutzung abhängen. Von wesentlicher Bedeutung ist das Verständnis über den holistischen Bewertungsrahmen. Jede Aktivität (vom Bau über die Erhaltung bis zum Abbruch / Recycling) aber auch die durch die Erhaltungsmassnahmen (positiv oder negativ) beeinträchtigte Nutzung des Strassenoberbaus spielen eine zentrale Rolle und sollten somit ökologisch, ökonomisch oder aus sozialer Sicht bewertet werden.

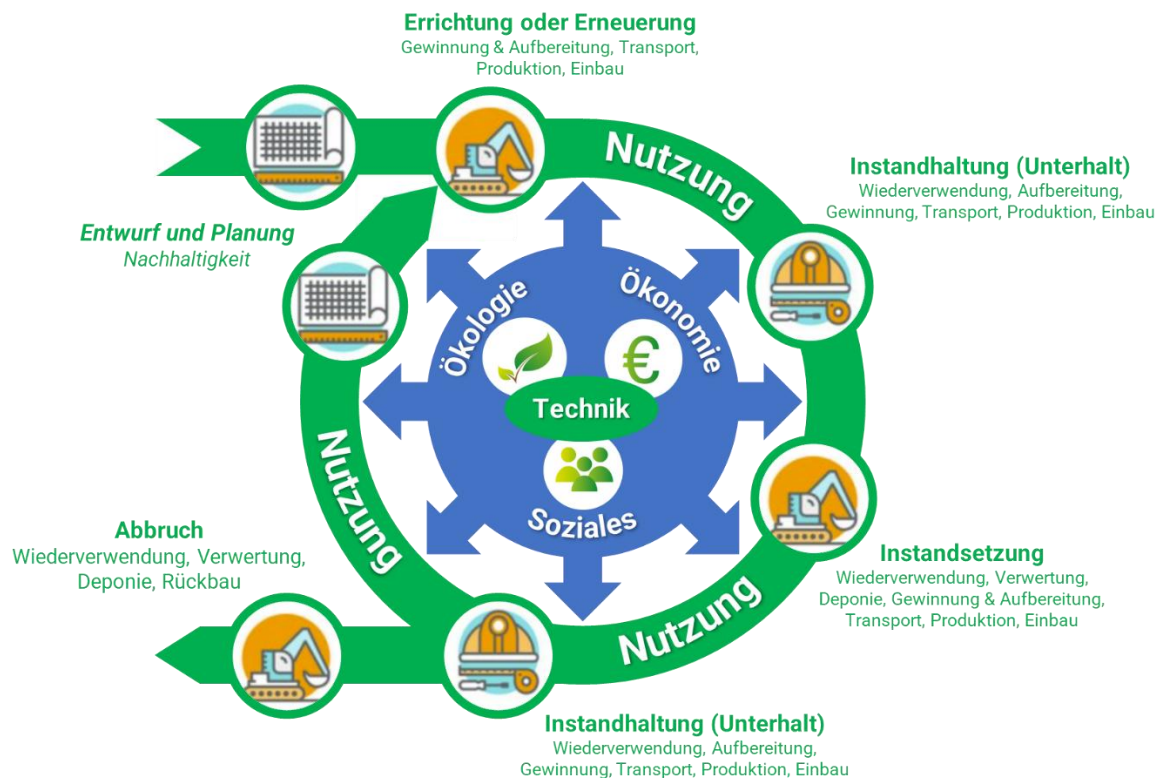


Abbildung 5: Schematische Darstellung des technischen Geltungsbereichs

Die Anzahl der durchzulaufenden Lebenszyklen ist dabei ein weiterer massgebender Einflussfaktor, wobei bereits der Begriff *Lebenszyklus-Strassenoberbau* definiert werden muss. Unter Bezugnahme auf der DACH-VIF Forschungsprojekte TAniA reicht der technische Lebenszyklus (=Lebensdauer) von der Errichtung oder Neukonstruktion einer Anlage der Verkehrsinfrastruktur bis zu ihrem Abbruch oder ihrer Ausserdienststellung [1]. Die nachfolgende Liste gibt einen Überblick, über die im Rahmen von SABINA definierten Technischen Geltungsbereiche:

- Bezüglich der Materialflüsse:
 - Wahl Bauweise, Baustoffe und Bindemittel
 - Materialgewinnung/Materialaufbereitung
 - Transport
 - Einbau
 - Ausbau, Transport
 - Wiederverwendung/Recycling, thermische Verwertung, Deponierung
- Bezüglich der Nutzung und der Erhaltung:
 - Errichtung oder Generalerneuerung
 - Instandhaltung (Unterhalt)

- Instandsetzung
- Teilerneuerung
- Ausbau, Wiederverwendung/Recycling, thermische Verwertung, Deponierung
- Bezüglich der Nutzerinnen- und Kundinnenansprüche:
 - Auswirkungen der baulichen Massnahmen auf die Ökobilanz durch einen verbesserten Zustand und die Verlängerung der technischen Nutzungsdauer durch reduzierte Emissionen, etc.
 - Auswirkungen der Erhaltungsmassnahmen auf den Verkehrsfluss während der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen (Dauer und Häufigkeit)

4.1.3 Zeitlicher Geltungsbereich

Der Betrachtungszeitraum und die vorgesehene Nutzungsdauer sind projektabhängig. Als Betrachtungszeitraum sollte mindestens die technische Nutzungsdauer gewählt werden.

Gemäss DACH-VIF-Projekt TAniA [1] entspricht die technische Nutzungsdauer dabei jenem Zeitraum, in dem eine abnutzbare Anlage technisch in der Lage ist, ihren Verwendungszweck zu erfüllen. Dieser beginnt mit der Herstellung bzw. Errichtung der Anlage und endet mit jenem Zeitpunkt, zu dem die Anlage soweit abgenutzt oder substanziell zerstört ist, dass eine bestimmungsgemässe Nutzung nicht mehr möglich ist. Die Abbildung 6 zeigt schematisch die Entwicklung des Zustandes über den technischen Lebenszyklus bzw. die technische Nutzungsdauer mit Bezug auf einen Strassenoberbau.

Um eine objektive und nachvollziehbare Aussage von bestimmten Oberbaulösungen zu erhalten, sollte zumindest die technische Nutzungsdauer betrachtet werden. Diese beinhaltet im Regelfall alle (plangemäss notwendigen) Erhaltungsmassnahmen und erlaubt somit einen objektiven Vergleich. Damit können auch alle Module gemäss der Europäischen Norm EN 15643-5 [12] betrachtet bzw. behandelt werden.

Da die technische Nutzungsdauer zwischen unterschiedlichen Varianten stark variieren kann (hängt auch wesentlich von der Bemessungsperiode ab, die der Dimensionierung zugrunde liegt), ist es unbedingt notwendig, die zu bewertenden Kennzahlen auf *jährliche* Werte umzurechnen, sofern nicht die Betrachtungsdauer ($\neq$ technische Nutzungsdauer!) für alle zu untersuchenden Varianten identisch ist. (Die Wahl einer einheitlichen Betrachtungsdauer für unterschiedliche Varianten erscheint im Vergleich zur Wahl der technischen Nutzungsdauer schwierig.)

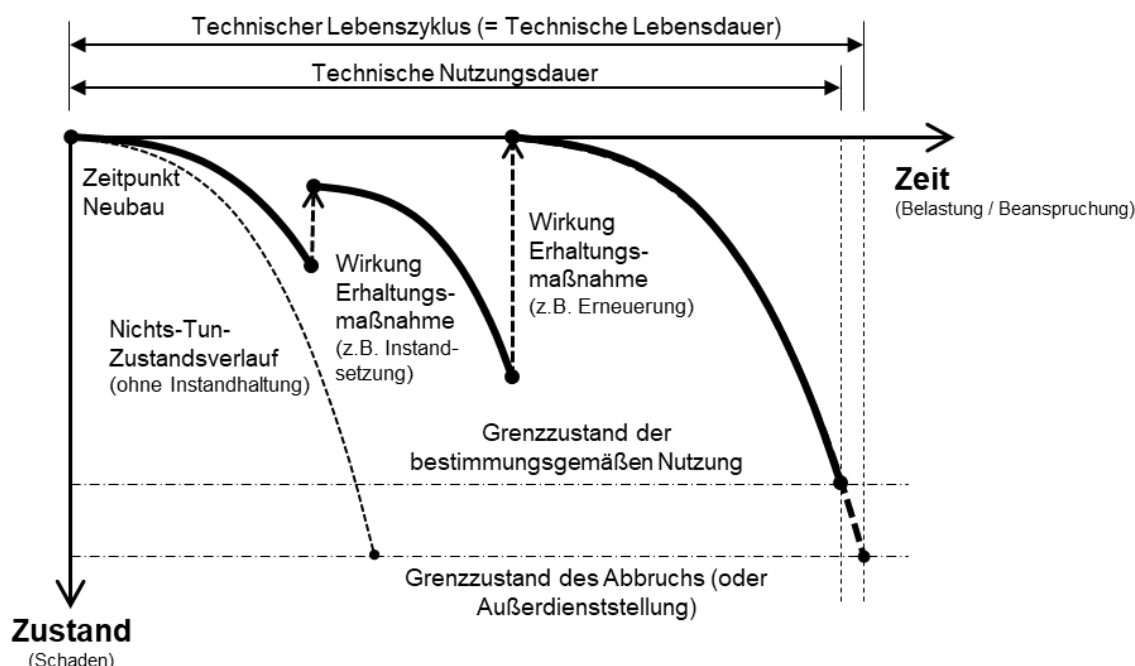


Abbildung 6: Schematische Darstellung des Zustandsverlaufes im technischen Lebenszyklus nach [1]

Auch die Sensitivität der Betrachtungsdauer auf die Ergebnisse ist dabei von wesentlicher Bedeutung. Natürlich ergeben sich bei stark unterschiedlichen technischen Nutzungsdauern auch entsprechende Einflüsse auf jährliche Kennzahlen. Da davon ausgegangen wird, dass in den meisten Fällen die technische Nutzungsdauer der zu untersuchenden Varianten ähnlich ist, erscheint die Verwendung von jährlichen Bezugswerten vorteilhaft. Bei Kostenindikatoren kann dies im Rahmen der Kapitalwertmethode durch die Berechnung einer Annuität erfolgen. Aber auch beim GWP kann z. B. der mittlere jährliche Verbrauch oder sogar die Einsparung auf die technische Nutzungsdauer sehr einfach bezogen werden.

4.1.4 Geographischer Geltungsbereich

Der geographische Geltungsbereich umfasst Strassenbauweisen in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Das entsprechende Land kann im SABINA-Bilanzrechner ausgewählt werden, wodurch sich die Hintergrunddaten dementsprechend automatisch anpassen.

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass bei der Auswahl des jeweiligen Landes auch die entsprechenden nationalen Schichtbezeichnungen bzw. Oberbauweisen gemäß den länderspezifischen Bemessungskatalogen abgebildet sind. Dies soll den Anwenderinnen die Nutzung des SABINA-Bilanzrechners vereinfachen.

4.1.5 Systemumfang und Gliederung

Die *holistische* Betrachtungsweise bedeutet, dass – nach dem Anspruch der Ganzheitlichkeit – neben der klassischen Ökobilanzierung auch ökonomische und (zumindest ausgewählte) soziale Aspekte mitberücksichtigt werden. Grundsätzlich steht es aber den Anwenderinnen frei, ob alle drei Bereiche für die Entscheidungsfindung herangezogen werden oder lediglich ein einzelner Aspekt ausgewertet wird.

Der gesamte Lebenszyklus ist sowohl durch lineare als auch zirkuläre Bestandteile geprägt (siehe Kapitel 4.2.1.6). Zirkuläre Bestandteile sind einerseits wiederkehrende Aktivitäten (z. B. bestimmte Erhaltungsmassnahmen) und andererseits Komponenten, die im zu betrachtenden Untersuchungsgegenstand oder in einem anderen (ähnlichen) Untersuchungsgegenstand wieder eingesetzt werden können (klassische Kreislaufwirtschaft). Dies bedeutet, dass der Begriff Kreislaufwirtschaft dabei nicht nur im *klassischen Sinne* auf das Produkt bzw. das Material bezogen wird, sondern auf wiederkehrende Aktivitäten im Bereich der Erhaltung zur Ausnützung oder sogar Verlängerung der technischen Nutzungsdauer des Strassenoberbaus.

Die zuvor beschriebene Abbildung 5 zeigt durch die Abzweigung des Lebenszykluskreises an den Anfang auch die Möglichkeit eines neuerlichen technischen Lebenszyklus durch eine Erüchtigung oder neuerliche Verwendung von bestimmten, den neuen Anforderungen entsprechenden Bauelementen bzw. Schichten (z. B. Weiterverwendung der ungebundenen Trag-schichten bei ausreichender Dicke und Frostsicherheit).

4.1.6 Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit (FE) wird 1 m² Strassenoberbau mit definiertem Aufbau und Mächtigkeit über einen definierten Betrachtungszeitraum verwendet. Über 1 m² Strassenoberbau können in Abhängigkeit von den Lastklassen und den damit verbundenen Schichtdicken die Mengen der jeweiligen Materialien (z. B. in m³ oder t) quantifiziert werden. Durch die Eingabe einer entsprechenden Streckenlänge und Oberbaubreite können dann für eine grössere Fläche (bis hin zu einem Baulos) die entsprechenden Kennwerte für ein gesamtes Projekt (umgesetzt im SABINA-Bilanzrechner) ermittelt werden.

4.2 Einflussfaktoren

4.2.1 Ökologische Einflussfaktoren

Im folgenden Unterkapitel werden die ökologischen Einflussfaktoren anhand der Lebenszyklusphasen gemäss EN 15643-5 beschrieben. Eine detaillierte Auflistung an Materialien, Transporten (Transportmittel, Massen, Distanzen), Baumaschinen und Baustellengeräten enthält der elektronische Anhang.

4.2.1.1 Materialversorgung (Modul A1)

Die Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe wird dem Modul A1 zugeordnet. Explizit sind darunter die Extraktion und Aufbereitung von Rohmaterialien, die Verwertung von Materialien aus einem vorausgehenden System und die Verarbeitung von notwendigen Sekundärstoffen zur Herstellung zu verstehen.

4.2.1.2 Transport (Modul A2)

Im Modul A2 werden die aufbereiteten (Roh-) Materialien aus Modul A1 von ihrem Gewinnungsort zum entsprechenden Mischwerk zur Weiterverarbeitung transportiert, z. B. von der Kiesgrube ins Betonwerk. Dabei wird der Transport über das Transportmittel, die zu transportierende Masse und die Distanz charakterisiert.

4.2.1.3 Herstellung (Modul A3)

Der Herstellungsprozess zeichnet sich durch die Kombination und Umwandlung verschiedener Ressourcen und Baustoffen zu einem Endprodukt aus. Das A3-Modul führt explizit zur Herstellung einer fertigen Mischung von Baustoffen, die als Baumaterial für das geplante Strassenbauwerk dient. Die Umweltwirkung während des Herstellprozesses entsteht durch die Verwendung von (Roh-) Materialien, Energiequellen, Strom und Heizung.

4.2.1.4 Transport (Modul A4)

Das Modul A4 beinhaltet den Transport von einbaufertigen Baustoffen und -materialien von dem Ort der Herstellung bis zur Baustelle bzw. zum Einbauort. Dies umfasst z. B. den Transport von Asphalt vom Mischwerk zur Baustelle. Die massgeblichen Faktoren für die ökologische Bewertung sind die transportierte Menge, die zurückgelegte Transportdistanz und die Auswahl des Transportmittels.

4.2.1.5 Einbauprozess (Modul A5)

Der Einbauprozess umfasst die physischen Prozesse im Bau des Strassenbauwerks vor Ort. In Bezug auf die ökologischen Auswirkungen ist die tatsächliche Nutzung der Baumaschinen und Baustellengeräte vor Ort von Bedeutung. Die Umweltwirkungen werden durch die benötigten Betriebsstunden für den Einbau der Baumaterialien und den damit verbundenen Kraftstoff- und Energieverbrauch quantifiziert. Dabei wird der Bedarf an Maschinenstunden über die zu verbauende Menge an Material hergeleitet.

4.2.1.6 Nutzungsphase (Module B1 bis B4)

Der Lebenszyklus einer Strasse enthält lineare und zirkuläre Anteile (Abbildung 7).

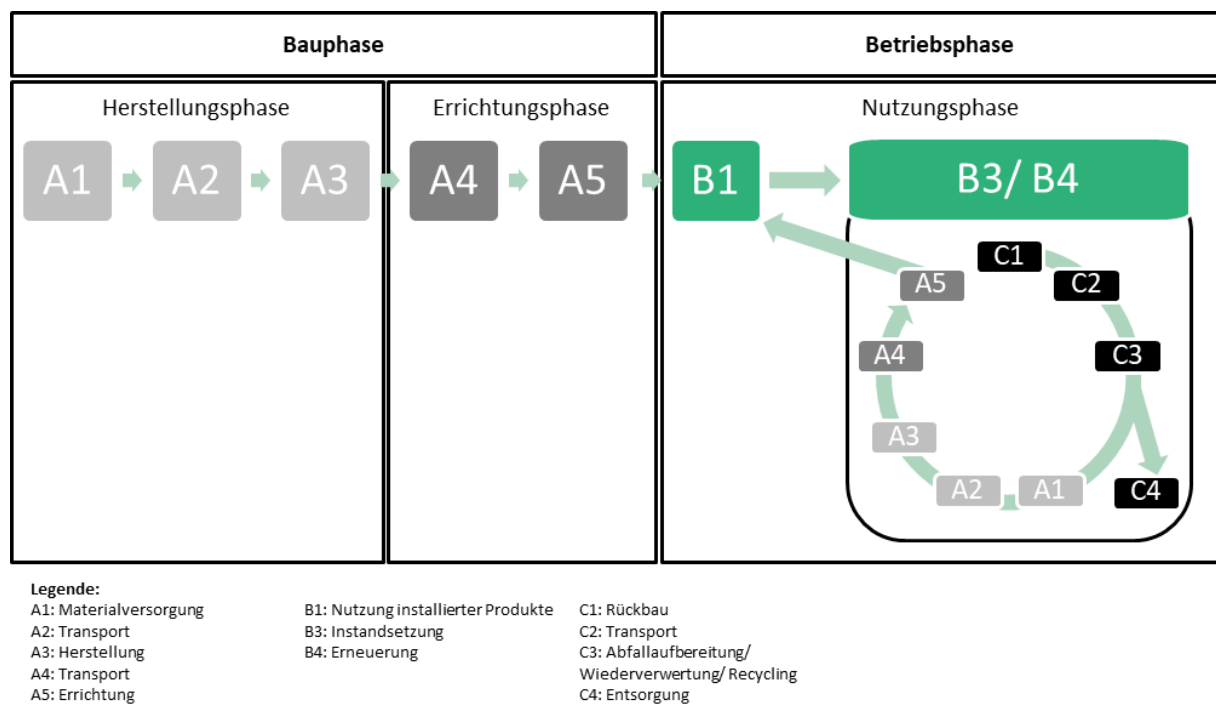


Abbildung 7: Standardlebenszyklus eines Strassenbauwerks mit linearen und zirkulären Anteilen [65]

Es wird angenommen, dass im linearen Teil der Darstellung die Strasse erstmalig auf einer neuen Trasse errichtet wird und dass ein Strassenbauwerk nach seiner Errichtung fortwährend besteht. Bis zur erstmaligen Nutzung der Strasse (Nutzung installierter Produkte – Modul B1) verläuft der Herstellungs- und Errichtungsprozess linear. Vom Materialbezug (Modul A1) über die Herstellung der Strassenbaumaterialien (Modul A3) bis hin zur Errichtung des Strassenbauwerks am vorgesehenen Ort (Modul A5) stellt der zeitlich in die Zukunft ausgerichtete Lebenszyklus einen geradlinigen Verlauf dar. Nach dem Übergang in die Nutzungsphase kann

das Strassenbauwerk von Verkehrsteilnehmern genutzt werden (Modul B1). Um einen dauerhaft nutzungsgerechten Zustand zu gewährleisten, sind regelmässige Instandsetzungsmassnahmen (Modul B3) sowie Erneuerungsmassnahmen (Modul B4) erforderlich. Die wiederkehrenden Erhaltungsmassnahmen zur Wiederherstellung des betriebsbereiten Zustands führen zu einem zirkulären Bezug innerhalb der Nutzungsphase, während der zeitliche Verlauf des Strassenbauwerks linear fortschreitet.

Im Rahmen der baulichen Erhaltungsmassnahmen werden Aspekte des Rückbaus (Module C1 bis C4) sowie der Herstellungs- und Errichtungsphase (Module A1 bis A5) berücksichtigt. Durch diese Darstellung ist eine modulare Berücksichtigung der Umweltwirkungen von einzelnen Prozessschritten möglich.

4.2.1.7 Rückbau (Modul C1)

Im Rückbau werden die in situ Arbeiten auf der Baustelle zum Aus- bzw. Rückbau betrachtet. Dabei wird der Einsatz an Baumaschinen und Baustellengeräten über die benötigten Maschinenstunden ökologisch bewertet. Es wird der Geräteeinsatz in Abhängigkeit von der zu verarbeitenden Menge an Material quantifiziert und die Umweltwirkung mit dem damit verbundenen Kraftstoff- und Energieverbrauch ermittelt.

4.2.1.8 Transport (Modul C2)

Das Modul C2 umfasst den Transport des Rückbaumaterials von der Baustelle zur Aufbereitungsanlage für die Wiederverwendung bzw. das Recycling (Modul C3) oder für die Entsorgung in einer Deponie (Modul C4). Dabei wird die Umweltwirkung durch die zu transportierende Menge an Material, das Transportmittel und die Transportdistanz beeinflusst.

4.2.1.9 Abfallaufbereitung / Recycling (Modul C3)

Im Modul C3 wird das Rückbaumaterial für die Wiederverwendung aufbereitet. Dabei werden die Aufwände berücksichtigt, bis das Material die Abfalleigenschaft verliert. Ab diesem Zeitpunkt verlässt das Material die Systemgrenze und die weiteren Prozesse werden dem nächsten Lebenszyklus angerechnet.

Das Flussdiagramm in Anhang B der Norm EN 15804 dient als Orientierungshilfe bei der Festlegung des Endes der Abfalleigenschaft.

4.2.1.10 Entsorgung (Modul C4)

Das Modul C4 *Entsorgung* beinhaltet die Beseitigung des Rückbaumaterials, welches nicht weiterverwendet werden kann. Dabei wird die Umweltwirkung durch die benötigten Maschinen und Emissionen in Luft, Wasser und Boden durch die Endlagerung in einer Deponie oder thermische Verwertung in einer Verbrennungsanlage quantifiziert.

4.2.2 Ökonomische Einflussfaktoren

Kosten während der Bau- und Betriebsphase sind der massgebende ökonomische Einflussfaktor. Unter den Kosten werden alle Aufwendungen verstanden, die zur Erbringung einer bestimmten Leistung notwendig sind. Kosten werden über monetäre Grössen ausgedrückt, wobei eine wesentliche Voraussetzung auch die Vergleichbarkeit der Kosten ist. Im Rahmen des Lebenszyklusmanagements werden grundsätzlich folgende Kosten unterschieden

- Direkte Kosten: das sind Kosten die direkt der Baulastträgerin, der Betreiberin oder der Eigentümerin zugeordnet werden können. Darunter fallen z. B. die Planungs- und Errichtungskosten aber auch die Kosten für den Betrieb eines Objektes oder einer Anlage
- Indirekte Kosten: das sind Kosten, die nicht direkt der Baulastträgerin, der Betreiberin oder der Eigentümerin, sondern anderen Stakeholderinnen zugeordnet werden. Dabei sind folgende Kosten bzw. Stakeholderinnen zu unterscheiden:
 - Nutzerinnenkosten: Nutzerin des Objektes
 - Externe Kosten oder Drittkosten
 - Anrainerin
 - Umwelt
 - Gesellschaft
 - etc.

Von zentraler Bedeutung ist dabei das Verständnis der Beeinflussbarkeit von Kosten im Lebenszyklus (Abbildung 8).

Kosten sind veränderliche Grössen, die laufend aktualisiert und angepasst werden müssen. Dabei ist auf den Baukostenindex zurückzugreifen, der jährlich aktualisiert wird und auf die Kosten umgelegt werden muss.

Stehen die Kosten für die Errichtung bzw. den Neubau, den Betrieb sowie die bauliche Erhaltung zur Verfügung, können diese analysiert bzw. zusammengefasst werden, wobei vor allem die Gesamtkosten aus Errichtung bzw. Neubau, Betrieb und Erhaltung sowie einer eventuellen

Verwertung bzw. eines Restwertes von wesentlicher Bedeutung für die Lebenszykluskostenanalyse sind.

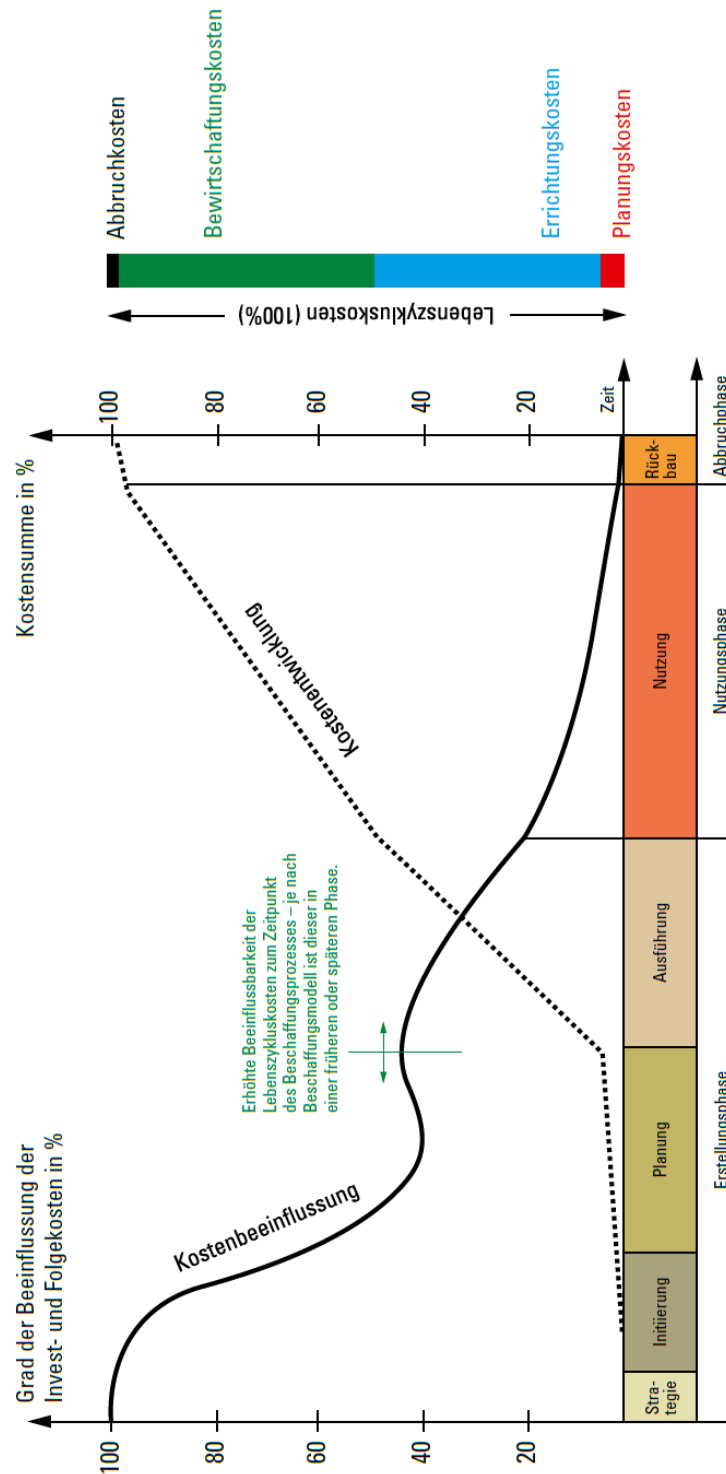


Abbildung 8: Beeinflussbarkeit von Kosten im Lebenszyklus [71]

Die Berechnung der Gesamtkosten muss im Sinne der Finanz- und Wirtschaftsmathematik

unter Heranziehung des Barwertes erfolgen. Dabei handelt es sich um jenen Wert, den eine zukünftige Zahlung in der Gegenwart unter Berücksichtigung von Zinseszinsen besitzt. Dieser Rechenvorgang wird als Abzinsung (Diskontierung) definiert [1]. Die am häufigsten verwendete Methode der Diskontierung ist die Kapitalwertmethode. Der Kapitalwert (Nettogegenwartswert, engl. NPV, net present value) ist eine Kennzahl der dynamischen Investitionsrechnung und ergibt sich aus der Summe der auf die Gegenwart abgezinste zukünftigen Erfolge einer Investition. Durch die Abzinsung von zukünftigen Kosten auf die Gegenwart wird der Zeitwert des Geldes berücksichtigt. Die Kapitalwertmethode erlaubt somit die Beurteilung von Investitionen über eine bestimmte, abgegrenzte Betrachtungsperiode.

Grundsätzlich kann und sollte, je nach gesetzlicher Vorgabe, eine Strasse (z. B. durch Maut) auch Einnahmen lukrieren, die in den meisten Fällen wesentlich vom Umfang und Ausmass der Nutzung abhängig sind. Bei einem Vergleich von unterschiedlichen Varianten der Strassenbefestigung sind diese Einnahmen nahezu identisch und würden sich automatisch aus der Berechnung kürzen, da deren Einfluss marginal ist. Lediglich der Abfluss von Verkehr im Rahmen von Baustellen könnte hier einen quantifizierbaren Einfluss aufweisen (Stichwort *Mautentgang*), wobei eine solche Modellierung eine umfassende Analyse der angrenzenden Netzkapazitäten und der gesetzlichen Möglichkeiten einer Verkehrsumlagerung beinhalten sollte.

Anders sieht die Situation aus, wenn beispielsweise bestimmte technische Einbauten in die Strasse (z. B. Induktionssysteme für E-Fahrzeuge) Einnahmen generieren. Weil solche Systeme heute bestenfalls in Erprobung, aber keinesfalls flächendeckend im Einsatz sind, wird diese Einnahmenkomponente im Projekt SABINA nicht berücksichtigt.

Für die Anwendung der Kapitalwertmethode im Rahmen der Lebenszykluskostenanalyse für ausschliessliche Investitionen (kein Kapitalrückfluss durch Einnahmen) ist es sinnvoll und zweckmässig, die allgemeine Funktion anzupassen und die notwendigen Investitionen als positiven Kapitalfluss zu definieren. Dies vereinfacht die Betrachtung vor allem dann, wenn keine Einnahmen gegenzurechnen sind, und entspricht auch der aktuellen Vorgehensweise in den einschlägigen Richtlinien (siehe z. B. RVS 13.05.11 [35]).

Mit der *Annuitätenmethode* kann der Kapitalwert einer Investition so auf die Nutzungsdauer verteilt werden, dass die Ein- und Auszahlungsfolge in eine *Annuität* umgewandelt wird (siehe Kapitel 6.2.1).

Im Rahmen der durchgeführten Analysen wurden insgesamt vier massgebende Bereiche der

ökonomischen Nachhaltigkeit definiert und Einflussfaktoren erarbeitet, aus welchen quantitative Indikatoren abgeleitet werden können. Tabelle 4 gibt einen entsprechenden Überblick. In den nachfolgenden Kapiteln wird explizit auf diese Bereiche eingegangen.

Tabelle 4: Indikatoren und Einflussfaktoren der ökonomischen Nachhaltigkeit

Bereich der ökonomischen Nachhaltigkeit	Erwünschter ökonomischer Effekt	Quantitativer Indikator
Strategie, Initiierung und Planung	Systematische Berücksichtigung der Nachhaltigkeit in der Planungsphase	Kapitalwert Bau & Erhaltung & Abbruch / Recycling; Annuität Bau & Erhaltung & Abbruch / Recycling
Errichtung - Baustoffwahl und Oberbaudimensionierung	Dauerhafte Konstruktion (lange Gebrauchsdauer/Lebenszeit)	Technische Nutzungsdauer; Kapitalwert Bau & Erhaltung & Abbruch / Recycling; Annuität Bau & Erhaltung & Abbruch / Recycling
	Geringer Investitionsaufwand	Baukosten (Errichtung)
Bauliche und betriebliche Erhaltung der Strasseninfrastruktur	Guter Strassenzustand (Verkehrssicherheit, Fahrkomfort, Minimierung des Erhaltungsaufwands)	Gebrauchswert, Substanzwert, I-Werte (CH)
Recycling	Kosteneinsparung durch Rückgewinnung und Wiederverwendung von Baustoff(komponenten)	Anteil Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung, Recyclingpotenzial (GWP); Kosten des Recyclingmaterials

4.2.2.1 Strategie, Initiierung und Planung

Dieser Bereich beinhaltet jene Kosten, die von der Definition der Strategie über die Initiierung einer Lösung bis hin zur Planung (Entwurf, Einreichung / Genehmigung und Detailplanung) entstehen. In dieser Phase sind auch die Ziele im Bereich Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie und Soziales) zu präzisieren und unterschiedliche Varianten, die nicht nur die Strassenbefestigung betreffen, zu untersuchen und objektiv zu bewerten (z. B. im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Untersuchung). Die im Rahmen der Planung zu ermittelten Kosten einer oder mehrerer Varianten sollten immer auch die Kosten des gesamten Lebenszyklus beinhalten. Somit sind die Kennzahlen aus Errichtung bzw. Neubau, Betrieb und Erhaltung sowie einer eventuellen Verwertung bzw. eines Restwertes zu berechnen (Kapitalwert und Annuität). Je umfangreicher eine Lösung ausfällt und je mehr Varianten untersucht werden, desto höher ist auch der Aufwand zur Abschätzung dieser Kennwerte. Unter Bezugnahme auf die Abbildung 8 ist es jedoch gerade dieser Bereich, der den grössten Einfluss auf die gesamten Lebenszykluskosten hat.

Eine gute, umfassende und auf Nachhaltigkeit orientierte Planung ist mit höheren Kosten verbunden, liefert jedoch in den meisten Fällen die optimale Lösung über den gesamten Lebenszyklus.

4.2.2.2 Errichtung - Bauweise, Baustoffwahl und Oberbaudimensionierung

In diese Kategorie fallen alle Kosten, die für die Errichtung des Oberbaus entstehen, ausgenommen, die zuvor beschriebenen Kosten aus Strategie, Initiierung und Planung. Es handelt sich in den meisten Fällen um Baulastträgerkosten. Es sei explizit erwähnt, dass die Auswahl der Konstruktion für die Errichtung bzw. den Neubau wesentliche Auswirkungen auf die gesamten Lebenszykluskosten hat. Dies ist bereits in der Planung der Varianten (siehe Kapitel 4.2.2.1) zu berücksichtigen. Es zeigt sich rasch, dass jene Konstruktionen, die insgesamt eine lange technische Nutzungsdauer aufweisen im Regelfall auch bessere ökonomische Kennwerte erzielen und zumindest aus der Sicht der Ökonomie zu bevorzugen sind.

4.2.2.3 Bauliche und betriebliche Erhaltung der Strasseninfrastruktur

Eine ökonomische Beurteilung der baulichen und betrieblichen Erhaltung des Strassenoberbaus kann über die zu bestimmten Zeitpunkten notwendigen Erhaltungsmassnahmen und die damit verbundenen Erhaltungskosten quantifiziert werden. Auch hier handelt es sich im Regelfall um Baulastträgerkosten, wobei Kosten für die Verkehrsführung und die Planung dieser Erhaltungsmassnahmen zum jeweiligen Erhaltungszeitpunkt X einzurechnen sind.

Da in den meisten Fällen bei Massnahmen am Strassenoberbau auch die Nutzerinnen betroffen sind, können auch monetäre Wirkungen im Bereich der Nutzerinnenkosten quantifiziert werden. Im Rahmen einer Nachhaltigkeitsanalyse wären diese im Bereich der sozialen Einflussfaktoren zu quantifizieren (siehe hierzu Kapitel 4.2.3). Dies gilt auch für die Quantifizierung von langfristigen Wirkungen durch eine Verbesserung des Strassenzustands nach einer Erhaltungsmassnahme, sodass Zustandsindikatoren und deren Änderung über die Zeit eine wesentliche Rolle spielen.

4.2.2.4 Recycling und Entsorgung

Im Rahmen der Wiederverwendung bzw. des Recyclings sind alle ökonomischen Auswirkungen zu quantifizieren, die entstehen, um eine Komponente bzw. ein Material des Oberbaus in der Kreislaufwirtschaft zu halten. Ist dies nicht möglich, so sind die entsprechenden Kosten für die Entsorgung, gegebenenfalls Deponierung zu berücksichtigen.

4.2.3 Soziale Einflussfaktoren

Ein wesentlicher Aspekt im Rahmen einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsanalyse ist die Berücksichtigung von *sozialen Auswirkungen* von Strassenbauprojekten (dritte Säule der Nachhaltigkeit). Im SABINA-Bilanzrechner können quantifizierbare soziale Auswirkungen im Hinblick auf die Wahl einer bestimmten Oberbaulösung berücksichtigt werden.

In Tabelle 5 sind jene sozialen Faktoren im Überblick erläutert, die in die Überlegungen zur Entwicklung des SABINA-Bilanzrechners eingeflossen sind. Sie sind in vier Bereiche der sozialen Nachhaltigkeit eingeteilt und betreffen Personen, die nicht einer Baulastträgerschaft (Strassenverwaltung) zuzurechnen sind.

Tabelle 5: Im Projekt SABINA berücksichtigte Einflussfaktoren der sozialen Nachhaltigkeit

Bereich	Erwünschter sozialer Effekt	Quantitativer Indikator
Qualität des Verkehrsablaufs	Reduktion der Beeinträchtigung durch Baustellen und Erhöhung der Verfügbarkeit	Anzahl und Dauer von Baustellen im gesamten Lebenszyklus, äquivalente Verkehrsbeeinträchtigung; zusätzliche Treibhausgasemissionen durch Stau während einer Baumassnahme (Abgrenzung zu Emissionen durch Erhaltungsmassnahme selbst)
Verkehrssicherheit	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch guten Strassenzustand und effizientes Baustellenmanagement während Herstellung und Nutzung	Zustand des Strassenoberbaus (Gebrauchswert), Anzahl und Dauer der Baustellen im gesamten Lebenszyklus, äquivalente Verkehrsbeeinträchtigung;
Qualität für anliegendes Wohnen / Aufenthalt	Geringe Beeinträchtigung durch Lärm, Luftverunreinigung und Erschütterung	Anzahl der (stark) betroffenen Personen in Lärmzone neben Strasse
Globaler Aspekt	Reduktion des Kraftstoffverbrauchs durch guten Strassenzustand (Rollwiderstand, Längsebenheit)	Energieverbrauch in Abhängigkeit von Längsebenheit; Umweltwirkungen als Funktion des zeit- und belastungsveränderlichen (Verkehrszuwachs) Strassenzustands

4.2.3.1 Qualität des Verkehrsablaufs

Gemäss den nationalen Richtlinien muss die Anlage von Strassen eine angemessene Linienführung und Querschnittsgestaltung im Hinblick auf die zu erzielende Leistungsfähigkeit (*Level of Service*) aufweisen, welche einen guten Verkehrsablauf und die Sicherheit aller Verkehrsteilnehmerinnen garantiert. Um die Auswirkungen von Baustellen auf den Verkehr zu minimieren und einen reibungslosen Verkehrsfluss sicherzustellen, müssen gegebenenfalls alternative Routen angeboten und die Baustellen sicher und effizient betrieben werden. Durch Baustellen entstehender zusätzlicher Stau sollte im Hinblick auf zusätzliche negative Auswirkungen, speziell auf die Umwelt, Berücksichtigung finden.

4.2.3.2 Verkehrssicherheit

Ein guter Strassenzustand (Oberflächenzustand) im Hinblick auf die Gebrauchseigenschaften (Gebrauchswert), eine sichere Verkehrsleitung durch Informations- und Verkehrsleitsysteme, Markierungen, Beleuchtung und Notfalleinrichtungen sind für die Verkehrssicherheit unerlässlich. Verkehrsteilnehmerinnen können mit einer stetigen und sicheren Fahrweise zur Sicherheit auf dem Strassennetz beitragen. Dies kann durch die Infrastruktur in Form von ausreichenden Halte- und Überholsichtweiten, auf die Geschwindigkeit dimensionierten Radianrelationen und gleichmässigen Streckencharakteristiken massgeblich unterstützt werden. Die Festlegung einer angemessenen Höchstgeschwindigkeit ist entscheidend, um Unfälle zu vermeiden. Eine weitere wichtige Sicherheitsfunktion der Strasseninfrastruktur liegt in der effizienten Abführung von Oberflächenwasser auf den Fahrbahnen, wodurch die Verkehrssicherheit erhöht wird.

4.2.3.3 Qualität für anliegendes Wohnen und Aufenthalt

Verkehrs- und baubedingte Beeinträchtigungen (wie Lärm, Luftverschmutzung, Erschütterung von anliegenden Gebieten) sind auf ein Minimum zu reduzieren. Dies kann z. B. durch die Verwendung von lärmindernden Asphaltdeckschichten, geeignete Geschwindigkeitsbeschränkungen und den Einsatz von Lärmschutzwänden erreicht werden. Strassen sollten bestmöglich in die Umgebung integriert werden, um den Flächenverbrauch sowie Bodenauftrag und Bodenabtrag (Geländeanpassung mit geringen Damm- und Einschnittthöhen) zu minimieren und auch ästhetische Aspekte zu berücksichtigen (siehe nationale Regelwerke).

Ziel ist ein möglichst geringer Verlust an Erholungsraum und schonender Eingriff in die Umwelt. Dies umfasst u. a. die grösstmögliche Erhaltung von vernetzten Landschafts- und Lebensräumen, um den Verlust von Habitaten oder die Zerschneidung von Biotopen zu reduzieren. Die besondere Berücksichtigung der standorttypischen Fauna und Flora, beispielsweise durch die Integration von Querungshilfen für wandernde Tiere oder die sorgfältige Planung der Wasserführung, können zum Artenschutz beitragen.

Ebenfalls sollten die Bedürfnisse der Verkehrsteilnehmerinnen und Anwohnerinnen berücksichtigt werden. Dies beinhaltet beispielsweise den barrierefreien Zugang zu Betankungs- und Lademöglichkeiten für Fahrzeuge, Verpflegungsmöglichkeiten oder sanitären Anlagen, um auch die Bedürfnisse von Menschen mit Behinderung zu erfüllen.

4.2.3.4 Globaler Aspekt

Der Verkehrssektor spielt eine entscheidende Rolle in den Bemühungen, den Klimawandel zu

bekämpfen und die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. Dazu zählt auch die Planung, der Bau und die Erhaltung der Strasseninfrastruktur. Ein oft übersehener, wichtiger Faktor in diesem Zusammenhang ist der Zustand der Strassen selbst, insbesondere in Bezug auf den Rollwiderstand und die Längsebenheit. Diese beiden Charakteristiken haben nicht nur einen Einfluss auf den Fahrkomfort der Verkehrsteilnehmerinnen, sondern auch auf den Energieverbrauch von darüber fahrenden / rollenden Fahrzeugen.

Der *Rollwiderstand* bezieht sich auf jene Energie, die benötigt wird, um Fahrzeuge auf der Strasse zu bewegen. Ein guter Strassenzustand mit geringem Rollwiderstand bzw. guter Längsebenheit kann erheblich dazu beitragen, den Kraftstoffverbrauch und die damit verbundenen Kosten und Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Zwar ist dabei je Fahrzeug nur eine kleine Einsparung zu quantifizieren, aber die Menge des Verkehrs und die Dauer (Jahre) können zu einem hohen Verlust- bzw. Einsparungspotenzial führen.

Die *Längsebenheit* bezieht sich auf die Gleichmässigkeit bzw. Welligkeit der Strassenoberfläche in Längsrichtung. Fahrbahnen mit unebener Oberfläche erfordern somit mehr Energie, was wiederum zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch führt. Eine gleichmässige Strassenoberfläche verringert nicht nur den Energieverbrauch der Fahrzeuge, sondern erhöht auch die Sicherheit und den Komfort der Fahrt.

4.2.3.5 Abgrenzung der sozialen Einflussfaktoren für das Projekt SABINA

Die Auswahl eines Strassenoberbaus ist nicht nur ein singulärer Prozess, sondern ein Teil einer umfassenden, fach- und themenübergreifenden Planung, die auch andere technische Teilbereiche mit Schwerpunkt Nachhaltigkeit beinhalten kann. Dies kann sogar so weit führen, dass z. B. auch eine Umweltverträglichkeitsprüfung vorgenommen werden muss und sich der holistische Ansatz einer Nachhaltigkeitsanalyse auf das gesamte Bauwerk erstreckt. Für die Auswahl der Einflussfaktoren bzw. des Untersuchungsrahmens für den Strassenoberbau sind bezüglich der sozialen Nachhaltigkeit folgende Kriterien massgebend:

- Die möglichen sozialen Auswirkungen können direkt auf die Wahl des Strassenoberbaus und die damit verbundenen Erhaltungsmassnahmen im Lebenszyklus zurückgeführt werden.
- Im Zuge der Wahl des Strassenoberbaus und der damit verbundenen Erhaltungsmassnahmen ergibt sich eine direkte Wirkung auf weitere Stakeholder (und nicht nur auf die Strassenbaulastträgerin) über den gesamten Lebenszyklus.
- Die möglichen sozialen Auswirkungen ändern sich mit der Wahl des Strassenoberbaus

und den damit verbundenen Erhaltungsmassnahmen im Lebenszyklus. Da im Rahmen von SABINA ein Vergleichsverfahren zur Anwendung gelangt, würden somit identische soziale Auswirkungen keinen Einfluss auf die Entscheidungsfindung haben.

- Es kann ein funktionaler Zusammenhang zwischen den technischen Parametern eines Strassenoberbaus, den durchzuführenden Erhaltungsmassnahmen und den Wirkungen der Erhaltungsmassnahmen im Lebenszyklus mit möglichen sozialen Auswirkungen hergestellt werden. Die Grundlagen hierfür sind objektiv und nachvollziehbar und auch abgrenzbar.

Um eine effiziente Abgrenzung auch bei den sozialen Auswirkungen zu ermöglichen und die Zielsetzung von SABINA nicht ausser Acht zu lassen, wird die soziale Nachhaltigkeit ausschliesslich auf den Strassenoberbau bezogen und nicht auf das Gesamtbauwerk Strasse. Es geht hierbei um die Bewertung einer bautechnischen Lösung für den Teilbereich (Untersuchungsgegenstand) Strassenoberbaus und nicht um die Entscheidungsfindung im Rahmen der Wahl von Trassen bzw. Korridoren, Trassierungselementen, Anordnung von Kunstbauwerken, etc. Auch die Vorgaben aus Planfeststellungsbeschlüssen (z. B. als Ergebnis eines UVP-Verfahrens) sind als Randbedingung bei der grundsätzlichen Auswahl von möglichen Lösungen zu berücksichtigen (siehe hierzu auch Anwendungsbereich Kapitel 1.2). Ergibt sich z. B. eine Anforderung für die Anwendung einer lärm mindernden Asphaltdeckschicht, so sollten nur jene Oberbauvarianten verglichen werden, die auch diese Anforderungen erfüllen.

Das Projekt SABINA dient somit grundsätzlich nicht dazu, einen Vergleich von möglichen sozialen Auswirkungen zwischen einer Lösung mit einer lärm mindernden Asphaltdeckschicht und einer Lösung ohne lärm mindernde Asphaltdeckschicht jedoch mit einer erhöhten Lärmschutzwand durchzuführen. Dies würde eine anlagenübergreifende Bewertung notwendig machen, sodass auch die Lärmschutzwand hierfür in die Beurteilung und somit in eine umfassende bzw. holistische Nachhaltigkeitsanalyse einzubeziehen wäre.

Die Bewertung im SABINA-Bilanzrechner (in der geplanten Ausbaustufe) erfolgt ausschliesslich anlagenspezifisch und nicht anlagenübergreifend. Grundsätzlich wäre es möglich, Varianten mit und ohne spezifische Anforderungen an den Lärm zu beurteilen. Die Abschätzung der notwendigen Auswirkungen auf die Anrainerinnen über unterschiedliche Lärmausbreitungen, deren zeitliche Veränderung durch Verkehr und / oder die Änderung der Anzahl an Anrainerinnen in einem bestimmten Immissionsbereich kann mit SABINA nicht modelliert werden und würde auch den Umfang des Projekts überschreiten. Hierfür kann auf andere, speziell für diese

Fragestellung konzipierte und auf nationale Richtlinien (z. B. RVS 04.02.11 in Österreich) basierende Entscheidungstools zurückgegriffen werden. Diese Grundlagen und Tools beinhalten im Regelfall eine anlagenübergreifende Analyse von möglichen Auswirkungen und können somit die notwendigen Eingangsdaten für SABINA liefern. Unter Bezugnahme auf die obigen Kriterien, die zu beantwortende Forschungsfrage und den anlagenspezifischen Bezug zum Strassenoberbau wird im Projekt SABINA der Untersuchungsrahmen für die soziale Nachhaltigkeit wie folgt definiert:

Der Untersuchungsrahmen für die soziale Nachhaltigkeit bezieht sich ausschliesslich auf öko-soziale Auswirkungen bei der anlagenspezifischen Bewertung von Lösungen des Strassenoberbaus. Neben der Strassenbaulastträgerin ist die Strassennutzerin adressiert, die direkt von baulichen Aktivitäten während des gesamten Lebenszyklus (vom Bau über die Erhaltung bis zum Abbruch / Recycling) betroffen ist. Dabei handelt es sich um die öko-sozialen Auswirkungen auf die Strassennutzerin einerseits infolge der kurzfristigen Veränderung (Beeinträchtigung) der Qualität des Verkehrsablaufs und der Verkehrssicherheit, andererseits infolge der langfristigen Verbesserung der Qualität des Strassenoberbaus (der Strassenoberfläche) als Folge der Erhaltungs-massnahmen.

Ein zentrales Thema für die Strassennutzerin ist die Verkehrssicherheit. Speziell bei der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen kommt es durch die Einrichtung und den Betrieb von Baustellen sowie möglichen Staus vor der Baustelle statistisch nachweislich zu einer erhöhten Anzahl von Unfällen. Die Ausführung von Sicherheitseinrichtungen und Absicherungen bei Baustellen hat nur bedingt mit der Wahl des Strassenoberbaus zu tun, kann aber im Zusammenhang mit Anzahl, Art und Dauer der zukünftigen Erhaltungsmassnahmen einen Einfluss generieren (z. B. flexiblere Verkehrsführung bei der Sanierung von Asphaltdeckschichten). Die Berücksichtigung ist daher notwendig.

Die soziale Nachhaltigkeit betrifft jedoch nicht nur die Strassennutzerin. Auch die Anrainerin ist im Zusammenhang mit möglichen Lärmemissionen, die direkt auf die Wahl des Strassenoberbaus (bzw. des Deckschichtmaterials) zurückzuführen sind, betroffen. Die damit verbundenen Auswirkungen sind unter dem Aspekt der sozialen Nachhaltigkeit zu quantifizieren. Wie oben beschrieben, sind die Lärmanforderungen an die Deckschicht vorgegebene Randbedingungen. Rein rechnerisch kürzen sich bei einem relativen Vergleich von unterschiedlichen Oberbaulösungen die Werte der gewählten Lärmkennzahlen heraus, sodass auf eine solche Berechnung verzichtet werden kann. Es erscheint in diesem Zusammenhang jedoch sinnvoll

und zweckmässig, entsprechende Hinweise bei der Auswahl der Deckschicht zu geben. Auch die direkte Eingabe von unterschiedlichen Wirkungen (berechnet über andere Entscheidungs- und Bewertungstools) sollte grundsätzlich möglich sein, sodass in der Darstellung der Ergebnisse dieser Einfluss quantifizierbar ist. Die hierfür zu verwendende Kennzahl wird im Rahmen der Modellierung noch festgelegt.

Unter Bezugnahme auf die obige Definition des Anwendungsbereiches der sozialen Nachhaltigkeit lassen sich folgende Bewertungsbereiche präzisieren:

- Wirkungen durch Baustellen infolge von Erhaltungsmassnahmen auf die Strassennutzerin:
 - Berücksichtigung von erhöhtem Treibstoffverbrauch durch zusätzlichen Stau und den daraus resultierenden zusätzlichen Emissionen.
 - Berücksichtigung von zusätzlichen Unfällen sowie Unfallfolgen durch die Baustellensituation und möglichen zusätzlichen Staus vor der Baustelle
- Wirkungen durch die Verbesserung des Strassenzustands auf die Strassennutzerin: Berücksichtigung von Einsparungen im Bereich Energie / Treibstoff durch eine Verbesserung des Rollwiderstandes und der Längsebenheit (jedoch wiederum mit zeitlicher Veränderung der Eigenschaften über die Zeit nach der Massnahme) und den daraus resultierenden reduzierten Emissionen.
- Wirkungen durch Lärmemissionen auf die Anrainerin: Diese kürzen sich aus der Rechnung, da für alle zu untersuchenden Oberbauvarianten die gleichen Randbedingungen im Hinblick auf Lärmanforderungen (sofern vorhanden) gelten müssen. Der SABINA-Bilanzrechner weist die Anwenderinnen entsprechend darauf hin.

5 DATENGRUNDLAGE UND DATENMANAGEMENT

5.1 Materialdaten

Der SABINA Bilanzrechner verfügt über zahlreiche länderspezifische Standardwerte für unterschiedliche Baustoffe und Bauweisen. Zur Berechnung dieser Standardwerte, welche von den Anwenderinnen im SABINA-Bilanzrechner ausgewählt werden können, wurden in der Software SimaPro eigene Prozesse erstellt (siehe Kapitel 5.2.1). Diese Prozesse enthalten die Rezepturen der unterschiedlichen Baustoffe. Die Herkunft dieser Rezepturen sowie die gesetzlichen Vorgaben sind in Tabelle 6 aufgeführt. Anhand dieser Rezepturen wurden die Massen der unterschiedlichen Inhaltsstoffe in die SimaPro-Prozesse eingetragen und die Standardwerte berechnet.

Tabelle 6: Herkunft der Rezepturen für die Baustoffe

Land	Herkunft	Gesetzliche Vorgabe
Deutschland	Institut für Strassenwesen, Technische Universität Braunschweig	TL Asphalt-StB (Technische Lieferbedingungen)
Österreich	Department Bauen und Gestalten, Hochschule Campus Wien	Richtlinien und Vorschriften für den Strassenbau (RVS)
Schweiz	ViaTec AG, Institut für Baustoffprüfung	SN EN 13108-1:2022

Im SABINA-Bilanzrechner besteht die Möglichkeit für jede Asphaltmischgutsorte, den RC-Gehalt in 5 %-Schritten zwischen 0 % und 95 % zu variieren. Eine Ausnahme ist Gussasphalt (MA, *Mastic Asphalt*), für den der RC-Gehalt regelwerkskonform immer 0 % beträgt. Da der RC-Gehalt für gewisse Asphaltmischgutsorten in länderspezifischen Normen geregelt ist, können im SABINA-Bilanzrechner RC-Gehalte gewählt werden, welche nicht der geltenden Norm entsprechen. Die Anwenderinnen des SABINA-Bilanzrechners müssen selbstständig sicherstellen, dass der gewählte RC-Gehalt mit den geltenden Normen kompatibel ist.

Mit zunehmendem RC-Gehalt steigt der Massenanteil an sekundärer Gesteinskörnung (Asphaltgranulat) im bitumengebundenen Mischgut. Dies hat zur Folge, dass der Massenanteil an primärer Gesteinskörnung (Füller, feine Gesteinskörnung < 2 mm und grobe Gesteinskörnung > 2 mm) abnimmt. Zur Modellierung der Rezepturen bei unterschiedlichen RC-Gehalten, wurden pro Mischgut jeweils zwei Rezepturen mit unterschiedlichen RC-Gehalten ausgewertet und die restlichen Rezepturen linear interpoliert.

5.2 Prozessdaten

5.2.1 Herstellung (Module A1 bis A3)

Zur korrekten Abbildung der Produktionsprozesse der verwendeten Beton- und Asphaltarten wurden Einheitsprozesse aus Ecoinvent sowie Daten aus der Industrie verwendet. Aus einem früheren Projekt verfügt die Umtec Technologie AG zudem über Prozessdaten von vier grossen Asphaltmischanlagen in der Schweiz. Mittels dieser Daten wurden die Produktionsprozesse in der Software SimaPro modelliert.

Der Produktionsprozess und insbesondere die verwendete Menge an Energie, Hilfsstoffen und Infrastruktur sind in den D-A-CH-Ländern identisch. Einzig die Rezepturen und Bezeichnungen der unterschiedlichen Mischgutsorten unterscheiden sich länderspezifisch. Ausserdem wurden für Deutschland und Österreich generische Hintergrunddaten aus Ecoinvent und für die Schweiz aus der UVEK-Datenbank verwendet.

Als Beispiel ist in Tabelle 7 der Produktionsprozess für eine Tonne Asphaltbeton der Sorte AC 11 H, PmB (RC-Gehalt 10 %, Verbraucher-Strommix, Heizöl) aus der Schweiz abgebildet, wie dieser in der Ökobilanzierungssoftware SimaPro modelliert wurde.

In Tabelle 8 ist der Produktionsprozess für einen Kubikmeter Beton C20/25, 0/32 mm, XC 1, XC 2 aus der Schweiz abgebildet, wie dieser in der Ökobilanzierungssoftware SimaPro modelliert wurde. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die entsprechenden Werte auch deutliche Abweichungen zu den Vorgaben in Deutschland und Österreich zeigen. Z. B. liegt der Zementgehalt für Betondecken in Österreich beim Unterbeton bei 350 kg/m³ und beim Oberbeton zwischen 400 und 450 kg/m³ nach RVS 08.17.02 [24]

Tabelle 7: SimaPro-Prozess für die Asphaltmischgutsorte AC 11 H Deckschicht aus der Schweiz

Komponente		Wert	Einheit	Prozess	Kommentar
AC 11 H Deckschicht, PmB, 10 % RC_UVEK	Bekannte Inputs aus der Technosphäre (Materialien/Energieträger)				
	Bitumen	49	kg	PmB mit 3,0 % SBS, ab Werk_UVEK	(1,1,1,1,1,2), Strassenbaubitumen
	Feine Gesteinskörnung 0/2, Brechsand	254	kg	Sand, at mine/CH U	(1,1,1,1,1,3), Feine Gesteinskörnung 0/2, Brechsand
	Grobe Gesteinskörnung > 2mm, Splitt	551	kg	Gravel, crushed, at mine/CH U	(1,1,1,1,1,3), Grobe Gesteinskörnung >2, Splitt
	Füller < 0.063mm	46	kg	Limestone, milled, loose, at plant/CH U	(1,1,1,1,1,3), Füller, <0.063mm
	Diesel für Baumaschinen	4.5	MJ	diesel, burned in building machine, average/MJ/CH U	(1,3,2,1,1,4), Diesel für die Baumaschinen (Radlader)
	Anlagen und Infrastruktur	6.6667E-6	kg	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant/RER/I U	(2,2,2,1,1,4), Anlagen und Infrastruktur
	Fördertechnik	33.333E-6	m	Conveyor belt, at plant/RER/I U	(2,2,2,1,1,4), Fördertechnik
	Gebäude, Halle	0.0005	m²	Building, hall, steel construction/CH/I U	(1,1,2,1,1,3), Gebäude, Halle
	Transport	31.7	tkm	transport, freight, lorry 32-40 metric ton, fleet average/CH U	(4,3,1,3,1,5,5), Transport
	Asphaltgranulat, RAP	100	kg	Asphaltgranulat RAP_UVEK	(1,2,2,1,1,4), RAP Asphaltgranulat, Transportdistanzgesteinskörnung von der Mine bis zum Mischgutwerk: 50km, Transportdistanz Bitumen von der Raffinerie in DE bis zum Mischgutwerk: 400km,
	Bekannte Inputs aus der Technosphäre (Strom/Heizung)				
	Strom	7.0	kWh	electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH U	(1,2,2,1,1,3), Strom, gemäss Daten MOAG, BHZ AG, BEO AG, Implenla
	Wärme	85.5	kWh	heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW/MJ/CH U	(1,3,2,1,1,4), Wärme in der Trocknertrommel (Brenner), Brennstoff Heizöl, Anteil im Schweizer Markt CH 1/4, gemäss Daten MOAG, BHZ AG, BEO AG, Implenla

Tabelle 7: SimaPro-Prozess für die Asphaltmischgutsorte AC 11 H Deckschicht aus der Schweiz - Fortsetzung

Komponente		Wert	Einheit	Prozess	Kommentar
AC 11 H Deckschicht, PmB, 10 % RC_UVEK	Emissionen in die Luft				
	Benzo(a)pyrene	4.66E-7	kg	Benzo(a)pyrene	Schätzung
	Abwärme	100	MJ	Heat, waste	Schätzung
	NMVOC	0.19	kg	NMVOC, non-methane volatile organic compounds	Schätzung
	Outputs zur Technosphäre. Abfälle und Emissionen zur Behandlung				
	Abfall	18.75	kg	disposal, inert waste, 5 % water, to construction waste landfill/kg/CH U	(2,3,2,1,1,4), Angaben gemäss MOAG
	Abwasser	0.000065	m³	Treatment, sewage, unpolluted, to wastewater treatment, class 3/CH U	(2,3,2,1,1,4), Angaben gemäss MOAG

Tabelle 8: SimaPro-Prozess für Oberbeton der Sorte C20/25, 0/32 mm, XC 1, XC 2 aus der Schweiz

Komponente		Wert	Einheit	Prozess	Kommentar
Oberbeton, C20/25, 0/32 mm, XC1, XC 2	Bekannte Inputs aus der Technosphäre (Materialien/Energieträger)				
	Zement	280	kg	CEM II/A cement, at plant	Betonsortenrechner treeze Ltd.
	Wasser	140	kg	tap water, at user	Betonsortenrechner treeze Ltd.
	Gesteinskörnung	1419.6	kg	Gravel, round, at mine	Betonsortenrechner treeze Ltd.
	Sand	400.4	kg	Sand, at mine	Betonsortenrechner treeze Ltd.
	Betonmischwerk	4.17 ^{E-7}	p	Concrete mixing plant	Infrastruktur und Hilfsstoffe aus Standardprozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Baumaschinen	0.4	MJ	diesel, burned in building machine, average	Infrastruktur und Hilfsstoffe aus Standardprozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Gummi	0.12	kg	Synthetic rubber, at plant	Infrastruktur und Hilfsstoffe aus Standardprozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Schmiermittel	0.02	kg	Lubricating oil, at plant	Infrastruktur und Hilfsstoffe aus Standardprozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Transport	0.036	tkm	transport, freight, rail, electricity with shunting	Transport Hilfsstoffe für Produktionsprozess aus Standardprozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Transport	0.007	tkm	transport, freight, lorry 32-40 metric ton, fleet average	Transport Hilfsstoffe für Produktionsprozess aus Standardprozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Transport	28	tkm	transport, freight, rail, electricity with shunting	Transport Gesteinskörnung, Zement und Wasser. Transportdistanzen aus [72]
	Transport	42	tkm	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, fleet average	Transport Gesteinskörnung, Zement und Wasser. Transportdistanzen aus [72]

Tabelle 8: SimaPro-Prozess für Oberbeton der Sorte C20/25, 0/32 mm, XC 1, XC 2 aus der Schweiz - Fortsetzung

Komponente		Wert	Einheit	Prozess	Kommentar
Oberbeton, C20/25, 0/32 mm, XC1, XC 2	Bekannte Inputs aus der Technosphäre (Strom/Heizung)				
	Strom	4.3	kWh	electricity, medium voltage, at grid	Infrastruktur und Hilfsstoffe aus Standard-prozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Wärme, Heizöl	8.2	MJ	light fuel oil, burned in boiler 10kW condensing, non-modulating	Infrastruktur und Hilfsstoffe aus Standard-prozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Wärme, Erdgas	5.7	MJ	natural gas, burned in industrial furnace 1MW	Infrastruktur und Hilfsstoffe aus Standard-prozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Outputs zur Technosphäre. Abfälle und Emissionen zur Behandlung				
	Produktionsabfall	5.38	kg	disposal, concrete, 5 % water, to construction waste landfill	Infrastruktur und Hilfsstoffe aus Standard-prozess: concrete for building construction, only common base, at plant
	Produktionsabfall	0.05	kg	disposal, municipal solid waste, 22.9 % water, to municipal incineration	Infrastruktur und Hilfsstoffe aus Standard-prozess: concrete for building construction, only common base, at plant

5.2.2 Transport (Module A2, A4 und C2)

Die Transportdistanz vom Asphalt- oder Betonwerk zum Verwendungsort (Modul A4) unterscheidet sich in jedem Bauprojekt. Aus diesem Grund haben die Anwenderinnen des SABINA-Bilanzrechners die Möglichkeit, die Transportdistanz sowie das verwendete Antriebssystem der LKW selbst auszuwählen. Gleiches gilt bei Erreichen der Lebensdauer einzelner Schichten des Strassenoberbaus. Die Anwenderinnen haben die Möglichkeit, die Transportdistanzen in die unterschiedlichen Verwertungs- und Entsorgungswege (Modul C2) selbst zu definieren. Die Transportdistanzen von der Rohstoffgewinnung ins Produktionswerk (Modul A2) sind hinterlegt und können durch die Anwenderinnen nicht verändert werden. Tabelle 9 zeigt die im SABINA-Bilanzrechner hinterlegten Transportdistanzen.

Die Grösse des LKW für den Transport kann nicht selbst definiert werden. Im SABINA-Bilanzrechner sind die Datensätze für einen LKW mit einem Gesamtgewicht zwischen 16 t und 32 t hinterlegt. Es stehen folgende Antriebssysteme zur Auswahl:

- Diesel
- Komprimiertes Gas
- Hybrid-Diesel
- Plugin-Hybrid-Diesel
- Batterieelektrisch
- Brennstoffzelle elektrisch

Tabelle 9: Transportdistanzen der Inhaltsstoffe im SABINA-Bilanzrechner

Bezeichnung	Transportdistanz CH [km]		Transportdistanz DE/ AT [km]		Quelle
	Bahn	LKW	Bahn	LKW	
Fugenmaterial (PE)	200	50	200	100	[72]
Gesteinskörnung, fein (< 2 mm)	0	20	0	50	[72]
Gesteinskörnung, grob (> 2 mm)	0	20	0	50	[72]
Betongranulat	0	20	0	50	Schätzung
Asphaltgranulat (RAP)	0	20	0	50	Schätzung
Füller	0	20	0	50	Schätzung
Strassenbaubitumen	600	100	600	100	Schätzung
Polymermodifizierte Bitumen	600	100	600	100	Schätzung
Gummimodifizierte Bitumen	600	100	600	100	Schätzung
Wachsmodifizierte Bitumen	600	100	600	100	Schätzung
Naturasphalt	600	100	600	100	Schätzung
Bitumenemulsion	600	100	600	100	Schätzung
CEM I	100	20	100	100	[72]
CEM II/A	100	20	100	100	[72]
CEM II/B CH-Mix	100	20	100	100	[72]
CEM II/B-LL	100	20	100	100	[72]
CEM III/A	100	20	100	100	[72]
CEM III/B	100	20	100	100	[72]
CEM ZN/D	100	20	100	100	[72]
Wasser	0	0	0	0	vernachlässigt
Luftporenbildner	600	50	600	100	[72]
Fließmittel	600	50	600	100	[72]
Cellulosefasern	0	665	0	665	ecoinvent
Rejuvenatoren	600	100	600	100	[72]

5.2.3 Errichtung (Modul A5) und Rückbau (Modul C1)

Zur korrekten Abbildung der bautechnischen Massnahmen während der Lebenszyklusabschnitte *Errichtung und Rückbau* sowie zur Ermittlung der Umweltwirkungen werden folgende

Angaben benötigt:

- Verwendete Baumaschinen
- Einbauleistung
- Maschinenstunden

Der Schweizerische Baumeisterverband (SBV) hat eine Software-Applikation mit dem Namen *TBViewer* entwickelt, welche dazu dient, technische Baubestimmungen und Normen in digitaler Form zugänglich zu machen. Der TBViewer verfügt über mehrere Tausend Bauprozessbeschreibungen, in welchen die Maschinen sowie deren Einbauleistung aufgeführt sind. Aufgrund dieser Angaben sowie den projektspezifischen Anforderungen werden die Maschinenstunden ermittelt. Ein Beispiel zur Veranschaulichung zeigt Tabelle 10. Auch innerhalb der drei D-A-CH-Länder bestehen unterschiedliche Vorgehensweisen. Während in der Schweiz die Schichten überwiegend aufgebrochen werden, erfolgt in Deutschland und Österreich im Regelfall ein (möglichst sortenreines) Fräsen der Schichten. Die Ursache für diese unterschiedlichen Verfahren liegt hauptsächlich im Prozess der Altasphaltzugabe bei der Wiederverwendung in der Asphaltmischanlage.

Tabelle 10: Bauprozessbeschreibung für das Aufbrechen einer Walzasphaltschicht

Bauprozessbeschreibung	Einheit	Maschinen	h/Einheit
Bitumenhaltige Schichten aufbrechen. Maschinell. Walzasphaltschichten. Schichtdicke mm 51 bis 100	m ²	Hydr-Bagger Pneu, -18 t, 115 kW	0.028

Den Angaben in Tabelle 10 lässt sich entnehmen, dass ein hydraulischer Pneubagger mit 18 t Gesamtgewicht und 115 kW Leistung rund 0.028 Stunden für das Aufbrechen von einem Quadratmeter Walzasphalt mit einer Schichtdicke von 51 bis 100 mm benötigt. Folglich kann dieser Bagger in einer Stunde knapp 36 Quadratmeter Walzasphalt aufbrechen. Sollen im Bauprojekt 500 Quadratmeter Strasse aufgebrochen werden, dauert dies somit rund 14 Stunden. Über die Umweltwirkungen, die dieser Pneubagger pro Betriebsstunde verursacht, kann anschliessend die Umweltwirkung für diesen Arbeitsschritt berechnet werden.

Für dieselbe bautechnische Massnahme existieren im TBViewer jeweils mehrere Bauprozessbeschreibungen, welche sich in den Abmessungen unterscheiden. So existieren für das Beispiel in Tabelle 10 rund vier Bauprozessbeschreibungen für unterschiedliche Schichtdicken der Walzasphaltschicht. Für grössere Schichtdicken werden noch zusätzliche Baumaschinen benötigt als im Beispiel. Da die Schichtdicke im SABINA-Bilanzrechner individuell definiert

werden kann, wird jeweils der Mittelwert derselben Bauprozesse für die unterschiedlichen Schichtdicken verwendet. Die verwendeten Baumaschinen für die Bauprozesse sowie die zugehörigen Einbauleistungen für die Errichtung (Modul A5) sind in Tabelle 11 und für den Abbruch (Modul C1) in Tabelle 12 ersichtlich.

Tabelle 11: Bauprozesse und Einbauleistungen für die Errichtung (Modul A5)

Schicht	Baumaschine	Einheit	h/Einheit
Asphaltbauweise			
Asphaltdeckschicht Walzasphalt	Pneuradwalze, -12 t / 25 t	t	0.056
	Vibrowalze, -10 t, selbstfahrend	t	0.056
	SD-Fertiger, Pneu, -5.1 m, hydr. Bohle	t	0.056
Deckschicht Gussasphalt	Radlader, - 6 t, 50 kW	t	0.036
	Silokipper, Thermomulde, 40 t, 5 Achsen	t	0.006
	Sattelzugmaschine, 3 Achsen, 6x4	t	0.024
	Gussasphaltkocher	t	0.024
	Gussasphaltbohle	t	0.016
Asphaltbinderschicht	Pneuradwalze, -12 t / 25 t	t	0.030
	Vibrowalze, -10 t, selbstfahrend	t	0.030
	SD-Fertiger, Pneu, -5.1 m, hydr. Bohle	t	0.030
	I01 523.113 00 Nivelliereinrichtung zu SD-Fertiger, ES	t	0.030
Asphalttragschicht	Pneuradwalze, -12 t / 25 t	t	0.032
	Vibrowalze, -10 t, selbstfahrend	t	0.032
	SD-Fertiger, Pneu, -5.1 m, hydr. Bohle	t	0.032
	Nivelliereinrichtung zu SD-Fertiger, ES	t	0.032
Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)	Hydr-Bagger Raupen, -18.0 t, 100 kW	m ³	0.041
	Raupenlader, -24 t, 150 kW	m ³	0.027
	Vibrowalze, -7 t, selbstfahrend	m ³	0.025
Bitumenhaftschrift	Kleindumper, Allrad, -1.0 m ³	m ²	0.001
	Spritzwagen -250 l Kalt-Bindemittel, als Anhänger	m ²	0.001
Asphaltfundationsschicht	Pneuradwalze, -12 t / 25 t	t	0.020
	Vibrowalze, -5 t, selbstfahrend	t	0.020
	SD-Fertiger, Pneu, -5.1 m, hydr. Bohle	t	0.020
Frostschuttschicht	Raupenlader, -15 t, 100 kW	m ³	0.031
	Vibrowalze, -10 t, selbstfahrend	m ³	0.031
Betonbauweise			
Oberbeton	Gleitschalungsfertiger	m ²	0.002
	Nachlaufbühne	m ²	0.003
	Auflagergerät, EM, -35 cm, ohne Vorschub	m ²	0.003
	Fugenfräse, -15 kW, 210 kg, 25 cm	m	0.055
	Radlader, - 6 t, 50 kW	m ³	0.027
	Hydr-Bagger Raupen, -18.0 t, 100 kW	m ²	0.002
Unterbeton	Gleitschalungsfertiger	m ²	0.002
	Nachlaufbühne	m ²	0.003
	Auflagergerät, EM, -35 cm, ohne Vorschub	m ²	0.003
	Hydr-Bagger Raupen, -18.0 t, 100 kW	m ²	0.002

Tabelle 12: Bauprozesse und Einbauleistungen für den Rückbau (Modul C1)

Arbeitsschritt	Baumaschine	Einheit	h/Einheit
Asphaltbauweise			
Aufbrechen	Fugenfräse, -15 kW, 210 kg, 25 cm	m	0.091
	Hydr-Bagger Pneu, -18 t, 115 kW	m ²	0.031
	Schraubenkompressor, -6.0 m ³ , VM, fahrbar	m ²	0.019
	Abbauhammer Druckluft, -30 kg	m ²	0.019
Fräsen	Lastwagen Kippbrücke ohne Allrad, - 26.0 t	m ²	0.016
Betonbauweise			
Aufbrechen	Bodensägen, Schnitt-Tiefe -300 mm	m	0.049
	Hydr-Bagger Raupen, -18.0 t, 100 kW	m ²	0.044
	Hydraulik-Hammer für Bagger, - 600 kg	m ²	0.044
Fräsen	Lastwagen Kippbrücke ohne Allrad, - 26.0 t	m ²	0.016
Fundationsschichten			
Aufbrechen	Hydr-Bagger Pneu, -18 t, 115 kW	m ²	0.009
	Hydr-Bagger Pneu, -18 t, 115 kW	m ²	0.010
	Hydr-Bagger Pneu, -18 t, 115 kW	m ²	0.012

5.2.4 Nutzung (Module B1 bis B4)

Die Anwenderinnen haben im SABINA-Bilanzrechner die Möglichkeit, die Nutzungsphase selbst zu definieren. Dies geschieht anhand von Baumassnahmen, welche innerhalb des zuvor definierten Betrachtungszeitraumes individuell hinzugefügt werden können. Auf diese Weise können die Anwenderinnen die Nutzungsdauer der unterschiedlichen Schichten des Strassenoberbaus ihren Bedürfnissen entsprechend definieren. So kann beispielsweise als erste Baumassnahme der Neubau einer Strasse modelliert werden und als zweite Baumassnahme der Austausch von Asphaltdeck- und -binderschicht.

5.2.5 Entsorgung (Module C3 und C4)

Im SABINA-Bilanzrechner stehen den Anwenderinnen drei unterschiedliche Verwertungs- bzw. Entsorgungswege zur Verfügung.

1. Verbrennung in der Müllverwertungsanlage
2. Aufbereitung in der Recyclinganlage
3. Endlagerung auf der Deponie

Die Anwenderinnen haben die Möglichkeit, die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Verwertungs- bzw. Entsorgungswege selbst zu definieren. Die Summe der prozentualen Anteile

muss dabei 100 % betragen, ansonsten wird eine Fehlermeldung angezeigt. Als Richtgrösse für die Schweiz können folgende Verteilungen angenommen werden, in Deutschland und Österreich auch Anteile von bis zu 100% sowohl für Asphalt als auch für Beton:

Tabelle 13: Richtgrössen Entsorgungswege Asphalt und Beton (Schweiz)

Entsorgungsweg	Massenanteil	
	Asphalt	Beton
Recycling	86 %	67 %
Deponierung	12 %	33 %
Verbrennung	2 %	0 %

5.3 Ökobilanzdaten

Eine Ökobilanz besteht im Regelfall aus zwei Arten von Datentypen:

1. Technische Vordergrunddaten, welche ein Produkt oder einen Prozess abbilden wie beispielsweise die Baumaschinen und Maschinenstunden für die Errichtung einer Strasse oder die Material- und Energiemengen zur Herstellung eines bitumengebundenen Mischgutes. Diese Daten werden von Industrie und Behörden zur Verfügung gestellt, stammen aus aktuellen Messungen oder aus der Fachliteratur und Expertenbefragungen. Es muss beachtet werden, dass die verwendeten Daten und das zu modellierende Produkt (oder der Prozess) eine technische, zeitliche und geografische Korrelation aufweisen. Beispielsweise ist eine Asphaltmischung aus dem Jahre 1950 aus Deutschland nicht mit einer heutigen Asphaltmischung aus der Schweiz zu vergleichen.
2. Generische Hintergrunddaten aus Ökoinventardatenbanken, mit welchen Hintergrund- oder Einheitsprozesse modelliert werden können (z. B. die Herstellung von 1kg Bitumen ab Raffinerie). Dazu wurde im Rahmen dieses Projekts auf die Ökoinventare Ecoinvent (für Deutschland und Österreich) und die UVEK-Datenbank (für die Schweiz) zurückgegriffen.

5.3.1 Datenbanken

Die generischen Hintergrunddaten von Ökobilanzen stammen oft aus Ökoinventardatenbanken wie Ecoinvent, GaBi, der UVEK-Datenbank und weiteren vergleichbaren Datenbanken. Die generischen Hintergrunddaten ergeben sich aus Mittelwerten und stammen aus Studien. Es ist wichtig den zeitlichen, geografischen und technischen Geltungsbereich dieser Daten zu

beachten, denn eine Tonne Zement aus Österreich unterscheidet sich bezüglich ihrer Umweltwirkung von einer Tonne Zement aus Deutschland oder der Schweiz (unterschiedliche Technologien, Rezepturen, Transportdistanzen, Energiemixe etc.). Um die Brauchbarkeit der generischen Hintergrunddaten abschätzen zu können, müssen der technische, zeitliche und geografische Geltungsbereich zwingend überprüft werden. Die im Rahmen dieses Projekts verwendeten Ökoinventardatenbanken Ecoinvent und die UVEK-Datenbank enthalten mehrere Tausend generischer Hintergrunddaten aus den Bereichen Transport, Energie, Materialien und Chemikalien.

5.3.1.1 Ecoinvent

Ecoinvent ist eine umfangreiche Datenbank für Ökobilanzen, die Informationen über den Lebenszyklus von Produkten und Dienstleistungen bereitstellt. Die Datenbank enthält detaillierte Informationen über die Umweltauswirkungen von Produkten und Dienstleistungen in jeder Phase ihres Lebenszyklus, von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, den Transport und die Nutzung bis hin zur Entsorgung. Die erste Version der Ecoinvent-Datenbank wurde erstmals 2003 von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) in der Schweiz veröffentlicht. Seitdem wurde die Datenbank kontinuierlich erweitert und aktualisiert, um die neuesten Entwicklungen und Technologien widerzuspiegeln. Die Datenbank enthält sowohl primäre als auch sekundäre Datenquellen. Primäre Datenquellen stammen direkt von Unternehmen, während sekundäre Datenquellen aus anderen Quellen wie öffentlich zugänglichen Datenbanken und wissenschaftlichen Studien stammen.

5.3.1.2 UVEK-Datenbank

Der UVEK Ökobilanzdatenbestand ist eine vom Eidgenössischen Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) betriebene Plattform der Schweiz, auf der Ökobilanzdaten von Produkten und Dienstleistungen bereitgestellt werden. Der UVEK Ökobilanzdatenbestand dient als Informationsquelle für Ökobilanzen und ist eine wichtige Referenz für die Bereitstellung von Hintergrunddaten in Ökobilanzen. Die Daten im UVEK Ökobilanzdatenbestand basieren auf der Ecoinvent-Datenbank und werden fortlaufend aktualisiert und ergänzt [64]. Im SABINA-Bilanzrechner wird der UVEK Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2022 [73] verwendet.

5.3.2 Verwendete Wirkungsabschätzungsmethoden

Die Ökobilanzierung im SABINA-Bilanzrechner erfolgt für das Treibhausgaspotenzial (GWP)

und den Energieverbrauch (KEA) gemäss ISO 14040 [9]. Da gewisse Umweltwirkungen mittels GWP und KEA nicht abgebildet werden können (z. B. nutzungsbedingte Emissionen), erfolgt zusätzlich eine Auswertung nach der EF3.1- Methode und für die Schweiz nach der Methode der ökologischen Knappheit (UBP 21).

5.3.2.1 Treibhausgasemissionen (IPCC 2021, GWP 100a)

Das Wirkungsabschätzungsmodell *Treibhausgasemissionen* (Englisch GWP, Global Warming Potential) beschreibt die kumulativen Wirkungen verschiedener Treibhausgase bezogen auf die Leitsubstanz Kohlendioxid (CO₂) über einen Zeitraum von 100 Jahren. Die Quantifizierung der Treibhauswirkung erfolgt auf Basis der Treibhauspotenziale des 6. Sachstandsberichts des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) [74].

5.3.2.2 Kumulierter Energieaufwand

Das Wirkungsabschätzungsmodell *kumulierter Energieaufwand* (Englisch CEM, Cumulative Energy Demand) quantifiziert den Primärenergiebedarf. Dabei wird unterschieden in erneuerbare und nicht erneuerbare Primärenergie. Letztere umfasst Energie aus fossilen und nuklearen Energieträgern sowie Holz aus Kahlschlag von Primärwäldern. Erneuerbare Primärenergie umfasst Energie aus Wasserkraft, Holz und Biomasse (ohne Kahlschlag von Primärwäldern), Sonne, Wind, Erdwärme und Umgebungswärme. Bewertet wird die geerntete Energiemenge [75]. Die Summe aus erneuerbarer und nicht erneuerbarer Primärenergie ergibt den kumulierten Energieaufwand. Rohöl bildet in diesem Modell die Referenzsubstanz und die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung werden in kWh Öl-eq/FE angegeben. Es wird die Methode *Cumulative Energy Demand* in der Version 1.09 verwendet.

5.3.2.3 Environmental Footprint

Das Wirkungsabschätzungsmodell *Environmental Footprint 3.1* (EF) umfasst 16 Wirkungskategorien (siehe Tabelle 14) und vereinheitlicht bestehende Ökobilanzmethoden. Das Regelwerk für EF 3.1 wurde von einem Expertinnengremium der EU (*Joint Research Center of the European Commission for LCA* (JRC)) entwickelt. Bei der Auswertung von insgesamt 16 Wirkungskategorien fallen 16 verschiedene Auswertungseinheiten an, z. B. kg CO₂-eq, kg SO₂-eq oder kg Sb-eq. Deshalb hat sich das Ökobilanzgremium des JRC auf ein Normierungs- und Gewichtung-Setting geeinigt, womit die 16 Wirkungskategorien auf ein eindimensionales Ergebnis in Umweltwirkungspunkte *EF 3.1-Punkte* ausgegeben wird.

Tabelle 14: Wirkungskategorien des Environmental Footprint 3.1 [76]

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Wirkungsabschätzungsmethoden	Einheit
Klimawandel	Erhöhung der Infrarotstrahlung	Strahlung als globales Erwärmungspotenzial, Zeithorizont 100 Jahre	kg CO ₂ eq
Stratosphärischer Ozonabbau	Ozonabbau-Potenzial (ODP, Ozone Depletion Potential)	EDIP-Modell, World Meteorolog. Organization, Zeithorizont 100 Jahre	kg CFC11 eq
Humantoxizität, krebserregend	Vergleichbare Toxizitätseinheit für Menschen (Comparative Toxic Unit for humans)	USEtox®2.1	CTUh
Humantoxizität, nicht-krebserregend	Vergleichbare Toxizitätseinheit für Menschen (Comparative Toxic Unit for humans)	USEtox®2.1	CTUh
Ökotoxizität, Frischwasser	Vergl. Toxizitätseinheit für Ökosysteme (Comp. Toxic U. for ecosystems)	USEtox®2.1	CTUe
Feinstaub	Auswirk. auf die menschl. Gesundheit, Ratio der Feinstaubaufnahme	Krankheitsinzidenz-Modell	Inzidenz
Ionisierende Strahlung	Menschliche Expositionseffizienz bezogen auf U-235	Modell zur Auswirkung auf menschl. Gesundheit	kBq U-235 eq
Bildung photochem. Ozon	Erhöhung des troposphärischen Ozons	LOTOS-EUROS-Modell	kg NMVOC eq
Versauerung, terrestrisch	Kumulative Überschreitungen hinsichtlich versauernder Wirkung	Kumuliertes Überschreitungsmodell	mol H ⁺ eq
Eutrophierung, terrestrisch	Kumulative Überschreitungen hinsichtlich eutrophierender Wirkung	Kumuliertes Überschreitungsmodell	mol N eq
Eutrophierung, Frischwasser	Anteil der Phosphornährstoffe, die ins Kompartiment Frischwasser gelangen	EUTREND-Modell	kg P eq
Eutrophierung, marin	Anteil der Stickstoffnährstoffe, die ins Kompartiment Meer gelangen	EUTREND-Modell	kg N eq
Landnutzung	Bodenqualitätsindex. Biotische Produktion. Erosionswiderstand. Mechanische Filtrierung. Grundwasseranreicherung. Veränderungen im organischen Bodenmaterial.	Bodenqualitätsindex wie im LANCA-Modell	Punkte
Wasserverbrauch	Potenzielle Einschränkungen für zukünftige Nutzerinnen. Wassernutzung bezogen auf lokale Wasserknappheit	AWARE-Modell	m ³ entzogen
Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	Abiotische Ressourcenaufzehrung (ADP _{ultimateReserven}) Abiotische Ressourcenaufzehrung (ADP _{reservebase})	Ultimate-Reserves-Modell	kg Sb eq
Ressourcennutzung, fossil	Abiotische Ressourcenaufzehrung (ADP _{fossil} & ADP _{reservebase})	CML-Modell	MJ eq

5.3.2.4 Methode der ökologischen Knappheit

Der Indikator *Umweltbelastungspunkte 2021* (UBP 2021) quantifiziert Umweltwirkungen, die

durch Nutzung von Energie- und stofflichen Ressourcen sowie von Land und Süsswasser, durch Emissionen in Luft, Gewässer und Boden, durch Ablagerung von Rückständen aus der Abfallbehandlung und durch Verkehrslärm entstehen. Die Beurteilung der Ökofaktoren Schweiz 2021 (gemäss den Umweltzielen [9]) gelingt anhand der UBP 2021 vollständig und entspricht dem Prinzip *True and fair view*. Die UBP 2021 haben den Vorteil, die Umweltwirkungen bezüglich der Schweizer Umweltziele gewichtet zu erfassen.

Die im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) erarbeitete UBP-Methode ist der Standard bei Ökobilanzen [77], [11], [78], liefert wichtige Entscheidungsgrundlagen und ist hilfreich in der Umweltgesetzgebung. Die Abbildung 9 zeigt einen Vergleich unterschiedlicher Wirkungsabschätzungsmethoden und welche Umweltwirkungen in den jeweiligen Methoden berücksichtigt werden.

Methode Umweltwirkung		Treibhausgasbilanz	Ökologischer Fussabdruck	UBP-Methode		ReCiPe 2016	Environmental Footprint v. 3.0	Impact-World+ (2019)
				Schweiz (UBP'21 CH)	Deutschland (UBP'15 DE)			
Ressourcen	Primärenergie, nicht erneuerbar	⊗	⊗	✓	✓	✓	✓	✓
	Primärenergie, erneuerbar	⊗	⊗	✓	✓	⊗	⊗	⊗
	Erze und Mineralien	⊗	⊗	✓	⊗	✓	✓	✓
	Süsswassernutzung	⊗	⊗	✓	✓	✓	✓	✓
	Biotische Ressourcen (Wildtiere)	⊗	⊗	✓	⊗	⊗	⊗	⊗
	Landnutzung (Biodiversität)	⊗	⊗	✓	⊗	✓	⊗	✓
	Landnutzung (Bodenfruchtbarkeit)	⊗	✓	⊗	⊗	⊗	✓	⊗
	Lebensräume im Meer (Biodiversität)	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Emissionen	Treibhausgas CO ₂	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Andere Treibhausgase	✓	⊗	✓	✓	✓	✓	✓
	Ozonschichtabbauende Stoffe	⊗	⊗	✓	⊗	✓	✓	✓
	Sommersmog	⊗	⊗	✓	✓	✓	✓	✓
	Humantoxizität	⊗	⊗	✓	✓	✓	✓	✓
	Ökotoxizität	⊗	⊗	✓	✓	✓	✓	✓
	Versauerung + Überdüngung	⊗	⊗	✓	✓	✓	✓	✓
	Radioaktive Emissionen	⊗	⊗	✓	⊗	✓	✓	✓
	Lärm aus Verkehr	⊗	⊗	✓	⊗	⊗	⊗	⊗
	Lichtverschmutzung	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗
Anderes	Abfälle	⊗	⊗	✓	✓	⊗	⊗	⊗
	Radioaktive Abfälle	⊗	⊗	✓	⊗	⊗	⊗	⊗
	Mikroplastik	⊗	⊗	✓	⊗	⊗	⊗	⊗
	Erosion von fruchtbarem Boden	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗	⊗

Abbildung 9: Umweltwirkungen und Bewertungsmethoden [79]

6 BERECHNUNG DER BEWERTUNGSINDIKATOREN

6.1 Randbedingungen und grundlegende Modellansätze

6.1.1 Allgemeine Randbedingungen

Eine wesentliche Voraussetzung für die sinnvolle Anwendung des SABINA-Bilanzrechners liegt in der Verfügbarkeit von Daten für die Berechnung der Bewertungsindikatoren. Die Verfügbarkeit von Daten hat auch einen wesentlichen Einfluss auf die zugrunde gelegten Berechnungsalgorithmen. Als massgebende Referenz für die Granularität der Eingangsdaten und letztendlich für die Auswahl der im SABINA-Bilanzrechner implementierten Modelle und Berechnungsalgorithmen dienen dabei die Richtlinien zur Dimensionierung des Strassenaufbaus in den D-A-CH-Ländern (z. B. in Österreich die RVS 03.08.63 [18] und in Deutschland die RStO 12 [13]) und die dazu notwendigen Daten.

Der SABINA-Bilanzrechner soll ohne grossen zusätzlichen Datenerhebungsaufwand von den Anwenderinnen *gefüttert* werden können. Dabei wird vorausgesetzt, dass SABINA primär als Entscheidungshilfe für die Untersuchung unterschiedlicher Oberbauvarianten konzipiert ist. Das heisst, die hauptsächliche Anwendung ist die Planungsphase z. B. im Rahmen eines Neubau-, Erneuerungs- bzw. Instandsetzungsprojekts.

Welche Daten bzw. Eingangswerte für die praktische Anwendung der Modelle notwendig sind, wird nachfolgend im Detail beschrieben. Liegen genauere Daten oder Erkenntnisse durch weiterführende spezielle Untersuchungen vor, so können die Eingangsdaten jederzeit auch iterativ verbessert werden. Die umfassende Dokumentation der Modelle soll es der Anwenderin ermöglichen, die ermittelten Bewertungsindikatoren nachrechnen sowie die in den Modellen verwendeten Parameter anpassen und prüfen zu können.

Grundsätzlich erfolgt die Berechnung der Bewertungsindikatoren und damit die Anwendung der Modelle für einen einzigen *Strassen- oder Erhaltungsabschnitt*, wobei die Festlegung des Abschnitts durch die Anwenderinnen generisch erfolgt. Dies bedeutet, dass keine Verortung im Strassennetz notwendig ist (z. B. über eine GIS-Grundlage). Im Rahmen der praktischen Anwendung wird auch empfohlen, den jeweils massgebenden Fahrstreifen für die Analysen auszuwählen. Grundsätzlich ist es möglich, für jeden einzelnen Fahrstreifen die Berechnungen getrennt durchzuführen und anschliessend die Ergebnisse im Rahmen einer weiterführenden Bearbeitung zu verknüpfen.

Es sei explizit angemerkt, dass es sich bei den Berechnungen stets um einen relativen Vergleich zwischen einer Basisvariante und einer Vergleichsvariante handelt, wobei bestimmte Eingangsgrösse für beide Varianten identisch sind (z. B. Verkehrsbelastung). So ist es möglich, unterschiedliche Bauweisen (z. B. flexibler Oberbau vs. starrer Oberbau) miteinander zu vergleichen und die jeweiligen Vor- und Nachteile in den nachfolgenden Entscheidungsprozessen zu implementieren. Weiterführende Details für die praktische Anwendung werden gesondert im Rahmen von Arbeitspaket AP7 gegeben und dargestellt.

6.1.2 Strassenaufbau

Eine zentrale Rolle für die Berechnungen spielt der betrachtete Strassenabschnitt. Dieser kann den spezifischen Anforderungen entsprechend in Asphalt- oder Betonbauweise erstellt werden. Auch eine Kombination beider Bauweisen ist möglich und kann im SABINA-Bilanzrechner abgebildet werden.

Die Lebenszyklusumweltbewertung eines Strassenabschnitts wird in unterschiedliche Lebenszyklusphasen unterteilt. Da in den D-A-CH-Ländern in den meisten Fällen, in welchen der SABINA-Bilanzrechner zur Anwendung kommen wird, bereits ein Strassenaufbau vorhanden ist, startet die Betrachtung mit der Entsorgungsphase (Module C1 bis C4). In dieser Lebenszyklusphase wird die Entsorgung des bereits bestehenden Strassenaufbaus bilanziert. Als nächstes folgt die Lebenszyklusphase der Herstellung (Module A1 bis A3), in welcher die Baumaterialien für den neuen Strassenaufbau gewonnen und produziert werden. Abschliessend folgt die Lebenszyklusphase der Errichtung (Module A4 und A5), in welcher die Baumaterialien zur Baustelle transportiert und der Strassenabschnitt gebaut wird.

Die nachfolgenden Formeln (Kapitel 6.1.2.1 bis 6.1.2.3) beziehen sich auf die Berechnung der Treibhausgasemissionen. Die Formeln sind allgemein gültig und können mit den entsprechenden Umweltkennwerten (EF) auch für die Berechnung anderer Umweltwirkungen verwendet werden.

6.1.2.1 Entsorgung (Module C1 bis C4)

In der Lebenszyklusphase der Entsorgung werden die Umweltbelastungen aus drei unterschiedlichen Modulen berechnet: Der *Abbruch (Rückbau)* der bestehenden Strasse oder Teilen davon (Modul C1), der *Transport* der rückgebauten Materialien von der Baustelle zum Ort der weiteren Behandlung (Modul C2) und die *Verwertung* dieser Materialien (Module C3 und

C4). Die Summe dieser Module ergibt die gesamten Umweltbelastungen während der Lebenszyklusphase der Entsorgung (Module C1 bis C4).

Abbruch der Strasse (Modul C1)

Aus den Angaben der Anwenderin zu Breite, Mächtigkeit und Länge des Strassenabschnitts werden die *Fläche* und das verdichtete *Volumen* jeder einzelnen Schicht des Strassenaufbaus berechnet. Dabei ist zu beachten, dass die Breite der Richtungsfahrbahn inklusive Seiten- und Standstreifen angegeben wird. Anhand der Dichte der verdichteten Asphaltlagen wird die Masse der einzelnen Asphaltmischgüter berechnet. Über die Einbauleistung der einzelnen Baumaschinen (h/m^2 , h/t oder h/m^3) wird die Laufzeit (Maschinenstunden) jeder Baumaschine ermittelt.

Das Projektkonsortium verfügt über ein umfangreiches Portfolio an Daten zu Baumaschinen und Umweltbelastungen je Betriebsstunde (z. B. $\text{CO}_2\text{-eq/h}$). Diese Daten werden mit der Laufzeit jeder Maschine multipliziert, woraus sich die Umweltbelastungen für den Abbruch einer Strasse ergeben.

Zusammenfassend erfolgt die Berechnung der Umweltwirkungen für den Abbruch einer Strasse nach folgender Multiplikation:

$$UB_{C1} = l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot \rho_B \cdot P_B \cdot EF_B \quad \text{Gl. 2}$$

mit

UB_{C1} Umweltbelastung aus dem Abbruch des Strassenabschnitts

l_s Länge des Strassenabschnitts [m]

b_s Breite des Strassenabschnitts (inklusive Seiten und Standstreifen) [m]

d_s Mächtigkeit (Schichtdicke) des Strassenaufbaus [m]

ρ_B Dichte des eingebauten (verdichteten) Baustoffs [t/m^3]

P_B Einbauleistung der Baumaschine [h/t]

EF_B Umweltkennwert (eco factor) der Baumaschine [$\text{CO}_2\text{-eq/h}$]

Transport zur Verwertung (Modul C2)

Die Berechnung der Umweltwirkungen für den Transport der abgebrochenen Strasse zum Ort der Verwertung erfolgt wieder über eine Massenermittlung. Die Masse an Mischgut wird auf die unterschiedlichen Verwertungswege (Recycling/Wiederverwendung, Verbrennung oder Deponierung) aufgeteilt und anschliessend mit der Transportdistanz zum jeweiligen Verwer-

tungsort multipliziert. Dieser Wert wird mit dem Umweltkennwert für das Transportmittel multipliziert, woraus sich die Umweltwirkung für den Transport zum Verwertungsort ergibt. Als Transportdistanz wird der einfache Weg (nur Hinfahrt) angegeben. Zusammenfassend wird die Umweltwirkung für den Transport zum Verwertungsort wie folgt berechnet:

$$UB_{C2} = l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot \rho_B \cdot n \cdot s \cdot EF_T \quad \text{Gl. 3}$$

mit

- UB_{C2} Umweltbelastung aus dem Transport in die Verwertung
- l_s Länge des Strassenabschnitts [m]
- b_s Breite des Strassenabschnitts (inklusive Seiten und Standstreifen) [m]
- d_s Mächtigkeit (Schichtdicke) des Strassenaufbaus [m]
- ρ_B Dichte des eingebauten (verdichteten) Asphaltmischgutes [t/m³]
- n Prozentualer Anteil je Verwertungsweg [%]
- s Transportdistanz in die Verwertung (einfacher Weg) [km]
- EF_T Umweltkennwert (eco factor) des Transportmittels [CO₂-eq/tkm]

Verwertung (Module C3 und C4)

Die Berechnung der Umweltwirkung der Verwertung erfolgt in Analogie zur obigen Massenermittlung. Anhand der Masse und der prozentualen Aufteilung auf die unterschiedlichen Verwertungswege wird die Masse je Verwertungsweg berechnet. Diese Masse wird mit dem Umweltkennwert für die Verwertung des Materials multipliziert. Zusammenfassend wird die Umweltwirkung der Verwertung wie folgt berechnet:

$$UB_{C3-C4} = l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot \rho_B \cdot n \cdot EF_V \quad \text{Gl. 4}$$

mit

- UB_{C3-C4} Umweltbelastung aus der Verwertung
- l_s Länge des Strassenabschnitts [m]
- b_s Breite des Strassenabschnitts (inklusive Seiten und Standstreifen) [m]
- d_s Mächtigkeit (Schichtdicke) des Strassenaufbaus [m]
- ρ_B Dichte des eingebauten (verdichteten) Baustoffs [kg/m³]
- n Prozentualer Anteil je Verwertungsweg [%]
- EF_V Umweltkennwert (eco factor) der Verwertung [CO₂-eq/kg]

6.1.2.2 Herstellung (Module A1 bis A3)

In der Lebenszyklusphase der *Herstellung* werden die Umweltwirkungen in drei Modulen berechnet: Die *Materialbereitstellung* (Modul A1), also die Gewinnung der Baustoffe (z. B. Kiesabbau), dem anschliessenden *Transport* (Modul A2) zum Produktionswerk (z. B. Betonwerk) und die *Produktion des Baustoffs* im Produktionswerk (Modul A3). Die Summe dieser Module ergibt die gesamten Umweltbelastungen während der Herstellung (Module A1 bis A3).

Materialbereitstellung (Modul A1)

Die Umweltbelastung aus der Materialbereitstellung ergibt sich aus der Summe der Umweltbelastungen für die Bereitstellung der unterschiedlichen Materialkomponenten multipliziert mit der jeweiligen Masse. Zusammenfassend wird die Umweltwirkung der Materialbereitstellung für einen Baustoff (wie Asphalt oder Beton) wie folgt berechnet:

$$UB_{A1} = m_1 \cdot EF_1 + m_2 \cdot EF_2 + m_3 \cdot EF_3 + \dots \quad \text{Gl. 5}$$

mit

UB_{A1} Umweltbelastung aus der Materialbereitstellung

m_{1-n} Masse der Inhaltsstoffe [kg]

EF_{1-n} Umweltkennwert (eco factor) der Inhaltsstoffe [CO₂-eq/kg]

Die Umweltwirkungen werden für *Asphalt pro Tonne* und für *Beton pro Kubikmeter* angegeben. Die Summe an Inhaltsstoffen muss für Beton der Dichte von Beton (ca. 2'400 kg/m³) entsprechen, bei Asphalt muss die Massensumme der Inhaltsstoffe exakt eine Tonne ergeben.

Der gesamte Strassenaufbau besteht aus einer Kombination mehrerer Baustoffe. So wird beispielsweise bei der Betonbauweise noch Fugenmaterial zwischen den Fahrbahnplatten verbaut, oder es wird optional eine Stahlbewehrung eingesetzt. Bei der Asphaltbauweise kann beispielsweise zwischen den einzelnen Asphaltschichten eine Haftschrift aus Bitumenemulsion, Splitt (grobe Gesteinskörnung mit Korngrössen 2 bis 32 mm) und Kalkhydrat eingebaut sein. Die Berechnung der gesamten Umweltwirkungen der Materialbereitstellung für die *Betonbauweise* wird wie folgt durchgeführt:

$$UB_{A1 \text{ Betonbauweise}} = l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot (EF_{\text{Beton}} + EF_{\text{Stahl}} \cdot x_{\text{Stahl}}) + l_F \cdot m_F \cdot EF_F \quad \text{Gl. 6}$$

mit

$UB_{A1 \text{ Betonbauweise}}$ Umweltbelastung aus der Materialbereitstellung in Betonbauweise

l_s Länge des Strassenabschnitts [m]

b_s	Breite des Strassenabschnitts (inklusive Seiten und Standstreifen) [m]
d_s	Mächtigkeit (Schichtdicke) des Strassenaufbaus [m]
EF_{Beton}	Umweltkennwert (eco factor) Beton [kg CO ₂ -eq/m ³ Beton]
EF_{Stahl}	Umweltkennwert (eco factor) Stahl [kg CO ₂ -eq/kg Stahl]
x_{Stahl}	Bewehrungsgehalt Stahl [kg Stahl/m ³ Beton]
l_F	Länge der Fugen [m]
m_F	Masse der Fugen [kg/m]
EF_F	Umweltkennwert (eco factor) Fugen [kg CO ₂ -eq/kg]

Die Gesamtlänge der Fugen wird wie folgt berechnet:

$$l_F = \frac{l_s \cdot b_s}{s_F - 1} + l_s \cdot (n_F - 1) \quad \text{Gl. 7}$$

mit

l_F	Länge der Fugen [m]
l_s	Länge des Strassenabschnitts [m]
b_s	Breite des Strassenabschnitts [m]
s_F	Fugenabstand [m]
n_F	Anzahl Fahrstreifen im betrachteten Strassenabschnitt [-]

Die Berechnung der gesamten Umweltwirkungen der Materialbereitstellung für die *Asphaltbauweise* wird wie folgt durchgeführt:

$$UB_{A1 \text{ Asphaltbauweise}} = l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot \rho_A \cdot EF_A + l_s \cdot b_s \cdot (m_H \cdot EF_H + m_{SP} \cdot EF_{SP} + m_K \cdot EF_K) \quad \text{Gl. 8}$$

mit

$UB_{A1 \text{ Asphaltbauweise}}$	Umweltbelastung aus der Materialbereitstellung in Asphaltbauweise
l_s	Länge des Strassenabschnitts [m]
b_s	Breite des Strassenabschnitts (inklusive Seiten und Standstreifen) [m]
d_s	Mächtigkeit (Schichtdicke) des Strassenaufbaus [m]
ρ_A	Dichte Asphalt (verdichtet) [kg/m ³]
EF_A	Umweltkennwert (eco factor) Asphalt [kg CO ₂ -eq/kg]
m_H	Masse Haftschrift pro Quadratmeter [kg/m ²]
EF_H	Umweltkennwert (eco factor) Haftschrift [kg CO ₂ -eq/kg]
m_{SP}	Masse Splitt pro Quadratmeter [kg/m ²]
EF_{SP}	Umweltkennwert (eco factor) Splitt [kg CO ₂ -eq/kg]
m_K	Masse Kalkhydrat pro Quadratmeter [kg/m ²]
EF_K	Umweltkennwert (eco factor) Kalkhydrat [kg CO ₂ -eq/kg]

Transport ins Produktionswerk (Modul A2)

Die Berechnung der Umweltwirkung des Transportes ins Produktionswerk erfolgt analog zum Transport zum Verwertungsort. Die Mengen der einzelnen Inhaltsstoffe, die für die Produktion eines Baustoffs benötigt werden, werden mit der Transportdistanz ins Produktionswerk und dem Umweltkennwert für das Transportmittel multipliziert. Die Transportdistanzen der Inhaltsstoffe ins Produktionswerk sind dabei im SABINA-Bilanzrechner vorgegeben und können (in der heutigen Ausbaustufe) durch die Anwenderinnen nicht verändert werden (siehe Tabelle 9). Zusammenfassend wird die Umweltwirkung für den Transport ins Produktionswerk wie folgt berechnet:

$$UB_{A2} = l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot EF_T \cdot (m_{B1} \cdot s_{B1} + m_{B2} \cdot s_{B2} + \dots) \quad \text{Gl. 9}$$

mit

UB_{A2} Umweltbelastung aus dem Transport ins Produktionswerk

l_s Länge des Strassenabschnitts [km]

b_s Breite des Strassenabschnitts (inklusive Seiten und Standstreifen) [m]

d_s Mächtigkeit (Schichtdicke) des Strassenaufbaus [m]

EF_T Umweltkennwert (eco factor) der Transportmittel [CO_2 -eq/tkm]

m_{B1-Bn} Masse der Baustoffe [t]

s_{B1-Bn} Transportdistanz der Baustoffe [km]

Produktion (Modul A3)

Die Berechnung der Umweltwirkung der Produktion eines Baustoffs im Produktionswerk ergibt sich aus der Summe an eingesetzten Energieträgern, Infrastruktur, Hilfsstoffen und bei der Produktion anfallenden Abfällen. Der Produktionsprozess für eine Tonne Asphalt ist in Tabelle 7 und für einen Kubikmeter Beton in Tabelle 8 dargestellt. Die Umweltwirkungen werden für Asphalt pro Tonne und für Beton pro Kubikmeter angegeben (siehe oben). Mittels folgender Formel werden die Umweltwirkungen aus der Betonproduktion berechnet:

$$UB_{A3} = l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot (m_B \cdot EF_B + m_E \cdot EF_E + m_I \cdot EF_I + m_A \cdot EF_A + \dots) \quad \text{Gl. 10}$$

mit

UB_{A3} Umweltbelastung aus der Produktion der Baustoffe

l_s Länge des Strassenabschnitts [m]

b_s Breite des Strassenabschnitts (inklusive Seiten und Standstreifen) [m]

d_s Mächtigkeit (Schichtdicke) des Strassenaufbaus [m]

m_B Masse der Baustoffe pro Kubikmeter [kg/m^3]

EF_B	Umweltkennwert (eco factor) der Baustoffe [CO_2 -eq/kg]
m_E	Menge der eingesetzten Energie pro Kubikmeter [kWh/m^3]
EF_E	Umweltkennwert (eco factor) der Energie [CO_2 -eq/ kWh]
m_I	Menge der Infrastruktur pro Kubikmeter [$Stk./m^3$]
EF_I	Umweltkennwert der Infrastruktur [CO_2 -eq/ $Stk.$]
m_A	Masse der Produktionsabfälle pro Kubikmeter [kg/m^3]
EF_A	Umweltkennwert (eco factor) der Entsorgung der Produktionsabfälle [CO_2 -eq/kg]

6.1.2.3 Errichtung (Module A4 und A5)

In der Lebenszyklusphase der Errichtung werden zwei Module von Umweltwirkungen berechnet. Der Transport der Baustoffe vom Produktionswerk auf die Baustelle (Modul A4) und die Errichtung des Strassenaufbaus (Modul A5) aus den bereitgestellten Baustoffen. Die Summe dieser Module ergibt die gesamten Umweltbelastungen während der Lebenszyklusphase der Errichtung (Module A4 und A5).

Transport zur Baustelle (Modul A4)

Die Berechnung der Umweltwirkung des Transportes vom Produktionswerk auf die Baustelle erfolgt anhand der Masse des verbauten Baustoffs und der Distanz vom Produktionswerk zur Baustelle, multipliziert mit dem Umweltkennwert für das Transportmittel. Die Anwenderin definiert das Antriebssystem des Transportmittels und die Transportdistanz zur Baustelle. Zusammenfassend wird die Umweltwirkung für den Transport zur Baustelle wie folgt berechnet:

$$UB_{A4} = l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot \rho_B \cdot s_B \cdot EF_T \quad \text{Gl. 11}$$

mit

UB_{A4}	Umweltbelastung aus dem Transport auf die Baustelle
l_s	Länge des Strassenabschnitts [m]
b_s	Breite des Strassenabschnitts (inklusive Seiten und Standstreifen) [m]
d_s	Mächtigkeit (Schichtdicke) des Strassenaufbaus [m]
ρ_B	Dichte des eingebauten (verdichteten) Baustoffs [t/m^3]
s_B	Transportdistanz auf die Baustelle (einfacher Weg) [km]
EF_T	Umweltkennwert (eco factor) des Transportmittels [CO_2 -eq/ tkm]

Bau der Strasse (Modul A5)

Die Berechnung der Umweltwirkung für den Bau der Strasse erfolgt analog zum Abbruch der

Strasse, nur dass andere Maschinen und Einbauleistungen verwendet werden. Die Umweltwirkung für den Bau der Strasse wird wie folgt berechnet:

$$UB_{A5} = l_s \cdot b_s \cdot d_s \cdot \rho_B \cdot P_B \cdot EF_T \quad \text{Gl. 12}$$

mit

UB_{A5} Umweltbelastung aus der Errichtung des Strassenabschnitts

l_s Länge des Strassenabschnitts [m]

b_s Breite des Strassenabschnitts (inklusive Seiten und Standstreifen) [m]

d_s Mächtigkeit (Schichtdicke) des Strassenaufbaus [m]

ρ_B Dichte des eingebauten (verdichteten) Baustoffs [t/m³]

P_B Einbauleistung der Baumaschine [h/t]

EF_B Umweltkennwert (eco factor) der Baumaschine [CO₂-eq/h]

6.1.3 Verkehrskennzahlen

Eine zentrale Rolle in der Lebenszyklusanalyse spielt die Verkehrsbelastung. Diese wird in erster Linie über die *Verkehrsstärke* (der unterschiedlichen Fahrzeugkategorien) und deren *Verteilung* über einen repräsentativen Tag in Form einer (relativen) Tagesganglinie abgebildet. Die Verkehrsstärke kann z. B. bei Bestandsstrecken über Verkehrszählungen und bei Neubaustrecken über die dem Bauprojekt zugrundeliegenden Verkehrsuntersuchungen erhoben werden. Folgende Eingangswerte sind im Vorfeld zu ermitteln (bzw. abzuschätzen) und als Eingangsgrößen zu verwenden:

- Gesamtverkehr als (jährliche) durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (J)DTV [KFZ/24 h]
- Schwerverkehr (jährliche) durchschnittliche tägliche Lastverkehrsstärke (J)DTLV [LKW/24 h] (in Deutschland DTV_{sv})

Da mit dem SABINA-Bilanzrechner die gesamte technische Nutzungsdauer bewertet wird, muss über eine mittlere Zuwachsrate z [%] die zukünftige Veränderung der Verkehrsbelastung abgeschätzt bzw. bis in das *Startjahr* der Analyse hochgerechnet werden, sofern dieses Jahr nicht dem Erhebungsjahr der Verkehrskennzahlen entspricht. Da in den D-A-CH-Ländern unterschiedliche Zuwachsmodele bzw. Funktionen in den Oberbaudimensionierungsrichtlinien verwendet werden (z. B. arithmetische Mittel der geometrischen Reihe in den österreichischen RVS 03.08.63 [18]), ist in Abhängigkeit von den dort verwendeten Modellen die Zuwachsrate

für die Eingabe im SABINA-Bilanzrechner vorab zu berechnen. Die Extrapolation der Verkehrsbelastung in das Startjahr erfolgt im SABINA-Bilanzrechner über folgende Wachstumsfunktion:

$$DTV_t = DTV_0 \cdot \left(1 + \frac{z_{VK}}{100}\right)^t \quad \text{Gl. 13}$$

mit

DTV_0 Verkehrsstärke zum Zeitpunkt 0 (aktueller Zeitpunkt) [KFZ/24h]

DTV_t Verkehrsstärke zum Zeitpunkt t [KFZ/24h]

z Zuwachsrate [%]

Wenn die Verkehrsprognosen in den Oberbaubemessungsrichtlinien beispielsweise auf dem arithmetischen Mittel einer geometrischen Reihe basieren (z. B. in Österreich und Deutschland), kann die im SABINA-Bilanzrechner verwendete Zuwachsrate der geometrischen Wachstumsfunktion mit etwa 50 % der ursprünglichen Zuwachsrate angesetzt werden.

Analog zum Gesamtverkehr kann auch für die Zunahme der Schwerverkehrsstärke unter Heranziehung der Zuwachsrate z der Schwerverkehr zu einem bestimmten Zeitpunkt t wie folgt berechnet werden:

$$DTLV_t = DTLV_0 \cdot \left(1 + \frac{z_{VK}}{100}\right)^t \quad \text{Gl. 14}$$

mit

$DTLV_0$ Schwerverkehrsstärke zum Zeitpunkt 0 (aktueller Zeitpunkt) [LKW/24h]

$DTLV_t$ Schwerverkehrsstärke zum Zeitpunkt t [LKW/24h]

z_{VK} Zuwachsrate Verkehr [%]

Die notwendige repräsentative (relative) Tagesganglinie wird durch die Anwenderin definiert. Dabei ist für jeden Stundenwert eines Tages der jeweilige Prozentsatz am Gesamtverkehr im SABINA-Bilanzrechner einzugeben. Es muss darauf geachtet werden, dass die Summe der Stundenwerte über den gesamten Tag 100 % ergibt. Die entsprechenden Stundenwerte der Verkehrsstärke ergeben sich wie folgt:

$$q_{t,h} = DTV_t \cdot \frac{p_{TGL,h}}{100} \quad q_{SV,t,h} = DTLV_t \cdot \frac{p_{TGL,h}}{100} \quad \text{mit} \quad \sum_{h=1}^{24} \frac{p_{TGL,h}}{100} = 1,0 \quad \text{Gl. 15}$$

mit

$q_{t,h}$ Stündliche Gesamtverkehrsstärke zum Zeitpunkt t in Stunde h [PKW/24h]

DTV_t Verkehrsstärke zum Zeitpunkt t (aktueller Zeitpunkt) [KFZ/24h]

$q_{SV,t,h}$ Stündliche Schwerverkehrsstärke zum Zeitpunkt t in Stunde h [LKW/24h]
 $DTLV_t$ Schwerverkehrsstärke zum Zeitpunkt t (aktueller Zeitpunkt) [LKW/24h]
 $p_{TGL,h}$ Anteil stündliche Verkehrsstärke am Gesamtverkehr in Stunde h aus der definierten Tagesganglinie [%]

Auf eine zeitabhängige Änderung der relativen Tagesganglinie wird im SABINA-Bilanzrechner verzichtet, da in den meisten Fällen entsprechende Daten nicht vorliegen oder die Veränderung der Verteilung des Tagesverkehrs, wenn überhaupt, nur sehr gering ist, sofern nicht Änderungen im Netz (Verfügbarkeit oder Nicht-Verfügbarkeit von nahegelegenen Strassen) absehbar und evaluierbar sind.

Beim Fehlen von Detaildaten kann grundsätzlich auf generelle repräsentative Tagesganglinien aus der Literatur zurückgegriffen werden, da sowohl für die Basisvarianten als auch für die Vergleichsvariante die gleichen Werte Berücksichtigung finden. Im Rahmen der praktischen Anwendung (Arbeitspaket AP7) werden einige Beispiele hierfür gegeben.

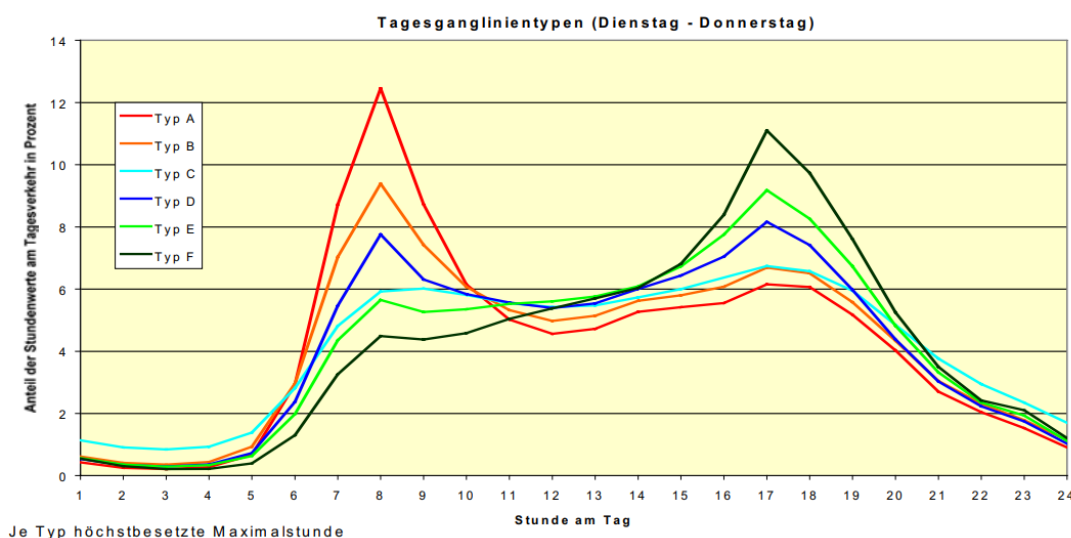


Abbildung 10: Beispiele Tagesganglinien [80]

Im Gegensatz zur Oberbaudimensionierung, wo der Schwerverkehr die massgebende Eingangsgrösse darstellt, sind für den SABINA-Bilanzrechner alle Fahrzeugkategorien massgebend (aufgrund der ganzheitlichen Berücksichtigung aller Aspekte der Nachhaltigkeit). Dabei wird bei Personenkraftwagen zwischen Fahrzeugen mit E-Antrieb (E-PKW) und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (PKW) unterschieden. Der Anteil an E-PKW wird über einen zeitabhängigen Prozentsatz definiert, der sich wie folgt ändern kann:

$$\text{Ant}_{\text{E-PKW},t} = \text{Ant}_{\text{E-PKW},0} \cdot \left(1 + \frac{Z_{\text{AntE-PKW}}}{100}\right)^t \quad \text{Gl. 16}$$

mit

$\text{Ant}_{\text{E-PKW},0}$ Anteil E-PKW am PKW-Verkehr zum Zeitpunkt 0 (aktueller Zeitpunkt) [%]

$\text{Ant}_{\text{E-PKW},t}$ Anteil E-PKW am PKW-Verkehr zum Zeitpunkt t [%]

$Z_{\text{AntE-PKW}}$ Zuwachsrate Anteil E-PKW [%]

Die für die weiterführenden Berechnungen notwendigen spezifischen Verkehrsstärken der E-PKW, der mit Verbrennungsmotoren betriebenen PKW und der LKW ergeben sich unter Berücksichtigung eines entsprechenden Anteils an Ausweichverkehr (durch eine Baustelle bzw. Massnahme) wie folgt:

$$\text{DTV}_{\text{E-PKW},t} = (\text{DTV}_t - \text{DTLV}_t) \cdot \frac{\text{Ant}_{\text{E-PKW},t}}{100} \cdot \left(1 - \frac{\text{Ant}_{\text{Ausw}}}{100}\right) \quad \text{Gl. 17}$$

$$\text{DTV}_{\text{PKW},t} = \left(\text{DTV}_t - \text{DTLV}_t - (\text{DTV}_t - \text{DTLV}_t) \cdot \frac{\text{Ant}_{\text{E-PKW},t}}{100}\right) \cdot \left(1 - \frac{\text{Ant}_{\text{Ausw}}}{100}\right) \quad \text{Gl. 18}$$

$$\text{DTV}_{\text{LKW},t} = \text{DTLV}_t \cdot \left(1 - \frac{\text{Ant}_{\text{Ausw}}}{100}\right) \quad \text{Gl. 19}$$

mit

DTV_t Gesamtverkehrsstärke zum Zeitpunkt t (aktueller Zeitpunkt) [KFZ/24h]

DTLV_t Schwerverkehrsstärke zum Zeitpunkt t [LKW/24h]

$\text{DTV}_{\text{E-PKW},t}$ Verkehrsstärke E-PKW zum Zeitpunkt t [E-PKW/24h]

$\text{DTV}_{\text{PKW},t}$ Verkehrsstärke PKW (mit Verbrennungsmotor) zum Zeitpunkt t [PKW/24h]

$\text{DTV}_{\text{LKW},t}$ Verkehrsstärke LKW zum Zeitpunkt t [LKW/24h]

$\text{Ant}_{\text{E-PKW},t}$ Anteil E-PKW am PKW-Verkehr zum Zeitpunkt t [%]

$\text{Ant}_{\text{Ausw},t}$ Anteil Ausweichverkehr Personenkraftwagen [%]

6.1.4 Treibstoff- und Energieverbrauch

6.1.4.1 Allgemeines

Um die Wirkungen des Verkehrs auf die Umwelt abschätzen zu können, ist es notwendig, den Zusammenhang zwischen dem Treibstoff- und Energieverbrauch, der Geschwindigkeit und dem Strassenzustand zu beschreiben und in den SABINA-Bilanzrechner zu implementieren. Diese funktionalen Zusammenhänge werden benötigt, um die Wirkungen auf das GWP durch Stauerscheinungen bei Erhaltungsmassnahmen abzuschätzen, die dann entstehen, wenn

durch die Baustellensituation die Kapazität bzw. die Leistungsfähigkeit des betroffenen Strassenabschnitts abnimmt. Umgekehrt können die Langzeitwirkungen durch eine Verbesserung des Strassenzustands zu einer mittel- bis langfristigen Reduktion der Fahrzeug-Emissionen führen. Speziell die dynamischen Wirkungen auf die Fahrzeuge und auch der damit verbundene Rollwiderstand sind bei einem guten Strassenzustand geringer, sodass auch der Treibstoff- bzw. Energieverbrauch sinkt.

In der Folge wird zunächst der Treibstoff- und Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für unterschiedliche Fahrzeugkategorien untersucht. Danach werden die Zusammenhänge zwischen Strassenzustand und Treibstoff- bzw. Energieverbrauch beschrieben, sodass abschliessend ein Gesamtmodell zum Treibstoff- und Energieverbrauch erstellt werden kann, welches die Grundlage für den SABINA-Bilanzrechner darstellt.

6.1.4.2 Treibstoff- und Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Der Treibstoff- bzw. Energieverbrauch ist bei motorisierten Fahrzeugen primär eine geschwindigkeitsabhängige Grösse. Grundsätzlich gilt, dass bei höheren Geschwindigkeiten der Treibstoff- und Energieverbrauch steigt, wobei dies wesentlich von der Fahrzeugkategorie und der Fahrweise abhängt. Auch die jeweilige Wahl der Übersetzung im Getriebe spielt vor allem bei LKW eine Rolle. Darüber hinaus steigt der Treibstoff- und Energieverbrauch bei geringen Geschwindigkeiten, wenn bei Stauerscheinungen die Fahrzeuge unregelmässig die Geschwindigkeit verringern oder erhöhen. Daraus ergibt sich bezüglich des Treibstoff- und Energieverbrauchs eine optimale Geschwindigkeit je Fahrzeugkategorie bzw. Fahrzeugtyp. Weil auf der Strasse unterschiedliche Fahrzeugtypen unterwegs sind – hauptsächlich Kleinwägen, SUV, leichte und schwere LKW, Busse – und im Regelfall die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte, wenn überhaupt nur rudimentär bekannt ist, wird für den SABINA-Bilanzrechner eine vereinfachte Kategorisierung an Fahrzeugkategorien und Geschwindigkeiten vorgenommen. In Anlehnung an die Kategorisierung der Verkehrsdaten in Kapitel 6.1.2 werden folgende Fahrzeugkategorien verwendet:

- Personenkraftwagen (PKW) mit Antrieb durch fossile Brennstoffe (Otto-Motor-Kraftstoffe),
- Personenkraftwagen mit Elektroantrieb (E-PKW) und
- Lastkraftwagen (LKW) mit Antrieb durch fossile Brennstoffe (Dieselfahrzeuge).

Der Treibstoff- und Energieverbrauch variiert stark in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Fahrzeugart. Die nachfolgend tabellarisch aufbereiteten Schätzungen basieren auf

typischen Verbrauchswerten, die aus verschiedenen Quellen wie Herstellerangaben, Fachzeitschriften, Studien von Umweltorganisationen und realen Fahrdaten stammen (*Fahrzeughersteller*: Verbrauchsangaben gemäss WLTP-Testzyklen. *Fachzeitschriften*: ADAC, AutoBild, Auto Motor und Sport. *Online-Datenbanken*: Spritmonitor.de, Fueelly.com. *Studien / Berichte*: International Council on Clean Transportation (ICCT), Umweltbundesamt (UBA).).

Sie wurden im Rahmen einer umfassenden Analyse unter Heranziehung von Chat GPT (durchgeführt am 5.8.2024) erhoben und dienen als Anhaltswerte für die notwendigen Eingangsdaten.

Der Verbrauch wird durch folgende Faktoren wesentlich beeinflusst:

- Anfahren und Beschleunigen: Erfordert mehr Energie als das Konstanthalten einer Geschwindigkeit.
- Motor-Ineffizienz bei niedrigen Geschwindigkeiten: Verbrennungsmotoren arbeiten bei niedrigen Geschwindigkeiten ineffizient, besonders im Stop-and-Go-Verkehr.
- Luft- und Rollwiderstand: Bei höheren Geschwindigkeiten steigen Luft- und Rollwiderstand, was zu einem höheren Verbrauch führt.

Im Bereich von 0 bis 20 km/h ist der Verbrauch besonders hoch, vor allem im Stop-and-Go-Verkehr. Der Vergleich zeigt:

- **Konstante Geschwindigkeit (0-20 km/h):** Der Verbrauch ist moderat, da der Motor in einem konstanten Zustand arbeitet und mässig Energie benötigt, um die Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Folgende mittlere Verbrauchswerte können angesetzt werden:
 - PKW: ca. 12-14 Liter/100 km
 - LKW: ca. 45-55 Liter/100 km
 - E-PKW: ca. 16-20 kWh/100 km
- **Stop-and-Go-Verkehr (0-20 km/h):** Der Verbrauch ist deutlich höher aufgrund des häufigen Anfahrens, das mehr Energie erfordert, um die Trägheit des Fahrzeugs zu überwinden. Bei jedem Anhalten und Anfahren steigt der Verbrauch erheblich. Folgende Verbrauchswerte können angesetzt werden:
 - PKW: bis zu 18 Liter/100 km
 - LKW: bis zu 60 Liter/100 km
 - E-PKW: bis zu 22 kWh/100 km

Die Geschwindigkeitsbereiche werden im SABINA-Bilanzrechner in 20 km/h-Cluster unterteilt

(siehe Tabelle 15). So kann die Anwenderin für die oben angeführten Fahrzeugkategorien den Treibstoffverbrauch (in Liter/100km) sowie den Energieverbrauch (in kWh/100km) individuell festlegen.

Demnach variieren der Treibstoff- und der Energieverbrauch je nach Fahrzeugtyp und Fahrbedingung erheblich. Insbesondere der Bereich 0-20 km/h zeigt, dass konstantes Fahren wesentlich weniger Energie benötigt als Stop-and-Go-Verkehr. Verbrennungsmotoren sind bei niedrigen Geschwindigkeiten ineffizienter, während Elektrofahrzeuge trotz höherem Verbrauch bei Stop-and-Go-Verkehr aufgrund der Rekuperation beim Bremsen (Rückgewinnung von Energie) effizientere Werte liefern. Da auch Stauvorgänge modelliert werden, ist für die Analyse der Wert aus der Stop-and-Go-Situation von besonderem Interesse.

Tabelle 15: Treibstoff- und Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für ausgewählte Fahrzeugkategorien

FZ-Kategorie	Geschwindigkeitsbereich [km/h]	Energie- und Treibstoffverbrauch		
		Min	Max	Mittel
PKW mit fossilem Treibstoff [Liter/100 km]	0-20 (Stop and Go)	12	18	15
	0-20 (konstant)	8	12	10
	20-40	8	10	9
	40-60	6	8	7
	60-80	5	7	6
	80-100	5	7	6
	100-120	7	9	8
	120-140	9	12	10.5
E-PKW [kWh/100 km]	0-20 (Stop and Go)	18	22	20
	0-20 (konstant)	12	16	14
	20-40	14	18	16
	40-60	12	16	14
	60-80	10	14	12
	80-100	12	16	14
	100-120	15	20	17.5
	120-140	18	25	21.5
LKW [Liter/100 km]	0-20 (Stop and Go)	50	60	55
	0-20 (konstant)	30	40	35
	20-40	35	45	40
	40-60	28	35	31.5
	60-80	22	28	25
	80-100	30	35	32.5

6.1.4.3 Treibstoff- und Energieverbrauch in Abhängigkeit vom Strassenzustand

In den 1980er und 90er Jahren untersuchte die *University of Birmingham* in Kooperation mit dem *Weltstrassenverband* (PIARC) den Zusammenhang von Strassenzustand und Fahrzeugbetriebskosten im Rahmen der Entwicklung der *Highway Design and Maintenance Standards Models HDM III* [81] und *HDM 4* [82].

Pichler [83] stellte die Änderung der Fahrzeugbetriebskosten in Abhängigkeit von der Längsebenheit dar und zeigte, dass bei einem Ebenheitskennwert *IRI* von ca. 4 m/km (International Roughness Index) bzw. bei einem s_w -Wert von 6.0 (Standardabweichung der Neigungsänderungen in ‰ (Winkelwerte, W-Werte) über das gewählte Auswertungsintervall) ein Anstieg von ca. 6 % in den Fahrzeugbetriebskosten zu erwarten ist. Als massgebende Kenngrössen der Strassenoberfläche werden die *Längsebenheit* und bei unbefestigten Strassen der *Rollwiderstand* definiert (wobei dieser bei befestigten Strassen einen geringen Einfluss auf die Fahrzeugbetriebskosten aufweist).

Im Jahr 2012 wurden durch Chatti und Zaabar [63] von der *Michigan State University* die Zusammenhänge aktualisiert (nach Weiterentwicklungen der Fahrzeuge z. B. hinsichtlich Verbrauch und Federung) und im Rahmen im Bericht NCHRP Report 720 *Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs* veröffentlicht. Für unterschiedliche Fahrzeugkategorien und Geschwindigkeitsbereiche wurden die Zusammenhänge zwischen der Längsebenheit, ausgedrückt durch den *IRI*, und dem zusätzlichen Treibstoffverbrauch neu kalibriert (Abbildung 11). Die Ergebnisse gelten für eine Strasse ohne Längsneigung und einen MPD-Wert von 1.0 mm (*Mean Profile Depth*, mittlere Profiltiefe) für die Makrotextur.

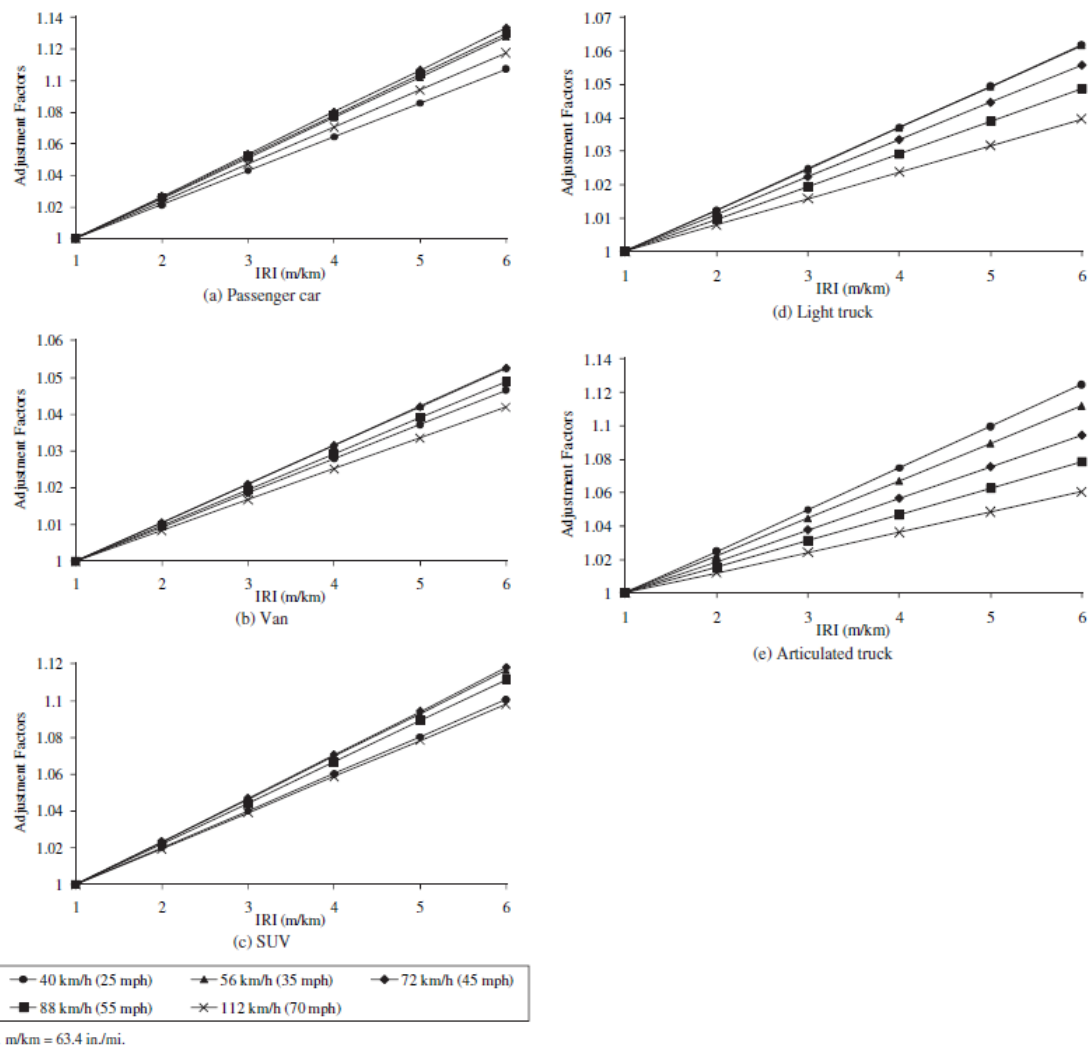


Abbildung 11: Zusammenhang IRI und zusätzlicher Treibstoffverbrauch für unterschiedliche Fahrzeugkategorien und Geschwindigkeiten (kalibrierte HDM 4 Modelle) nach [63]

Im Zuge von weiterführenden Arbeiten und Untersuchungen durch die *University of Michigan* wurden diese Zusammenhänge mit einem mechanistischen Ansatz für ein LKW-Quarter-Car modelliert und mit Messungen aus [63] verglichen. Die Ergebnisse wurden beim *International Forum for Heavy Vehicle Transport & Technology* 2018 veröffentlicht [84] (Abbildung 12).

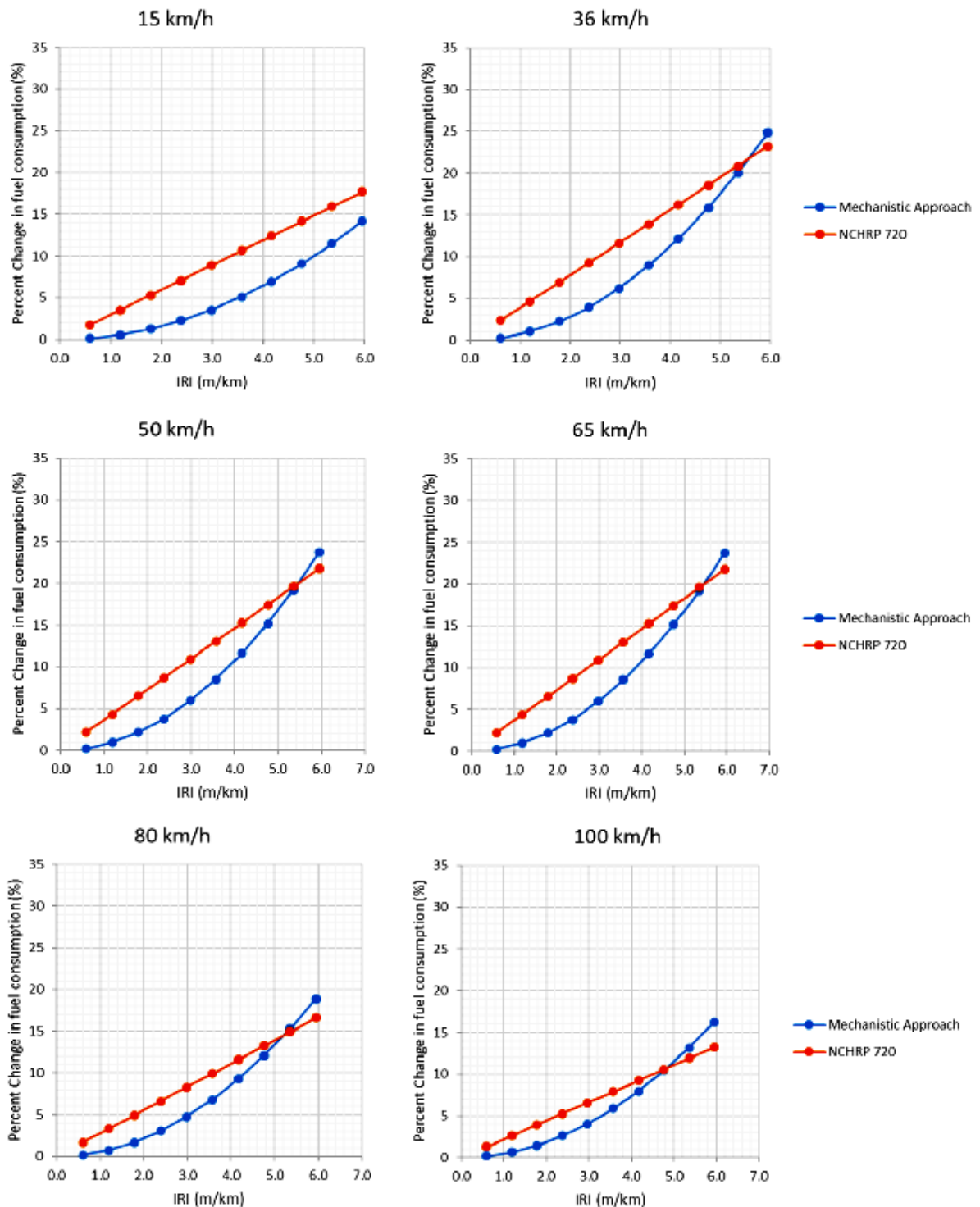


Abbildung 12: Zusammenhang IRI und zusätzlicher Treibstoffverbrauch für unterschiedliche Geschwindigkeiten von Lastkraftwagen [84]

Mit diesen Untersuchungen wurde gezeigt, dass sich der Treibstoffverbrauch für PKW und LKW mit der Längsunebenheit der Strasse und der gefahrenen Geschwindigkeit erhöht. Dieser

Zusammenhang kann unter Heranziehung der Erkenntnisse nach [63] durch eine lineare Funktion beschrieben werden. Der Erhöhungsfaktor kann bei LKW bis zu 20 Prozent betragen. Der Bezugswert für den Erhöhungsfaktor ist ein IRI von 1.0 m/km.

In den SABINA-Bilanzrechner fließt der gemessene oder ein angenommener IRI-Wert ein. Folglich ergibt sich aus der Verbesserung des Strassenzustands auch eine (rechnerische) Reduktion des CO₂-Ausstosses. Da die zuvor beschriebenen Zusammenhänge gegebenenfalls an örtliche Randbedingungen angepasst werden müssen, hat die Anwenderin jederzeit die Möglichkeit, diese linearen Funktionen zu ändern. Unter Bezugnahme auf die zur Verfügung stehende Datengranularität der Eingangsdaten wurden aus den Erkenntnissen von [63] und [84] entsprechende Vereinfachungen in der Kategorisierung abgeleitet, die eine effiziente Anwendung ermöglichen (Gl. 20).

$$EFT_{IRI,j,V} = k_{IRI,j,V} \cdot IRI + d_{IRI,j,V} \quad \text{Gl. 20}$$

mit

$EFT_{IRI,j,V}$ Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie j aufgrund der Längsebenheit (IRI) und der Geschwindigkeit V

$k_{IRI,j,V}$, $d_{IRI,j,V}$ Modellparameter der Fahrzeugkategorie j und der Geschwindigkeit V

Tabelle 16 gibt Empfehlungen für die Modellparameter k und d zur Berechnung des Erhöhungsfaktors *Treibstoff* $EFT_{IRI,j,V}$, wobei der Erhöhungsfaktor auch für den zusätzlichen Energieverbrauch bei E-PKW herangezogen werden kann. In Abbildung 13 sind die Zusammenhänge graphisch dargestellt.

Tabelle 16: Modellparameter k und d für den Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch

Fahrzeugkategorie	Geschwindigkeitsbereich [km/h]	Modellparameter	
		k	d
Personenkraftwagen	[0 – 20]	0,02	0,98
	> 20	0,03	0,97
Lastkraftwagen	[0 – 20]	0,03	0,97
	[20 – 60]	0,05	0,95
	> 60	0,04	0,96

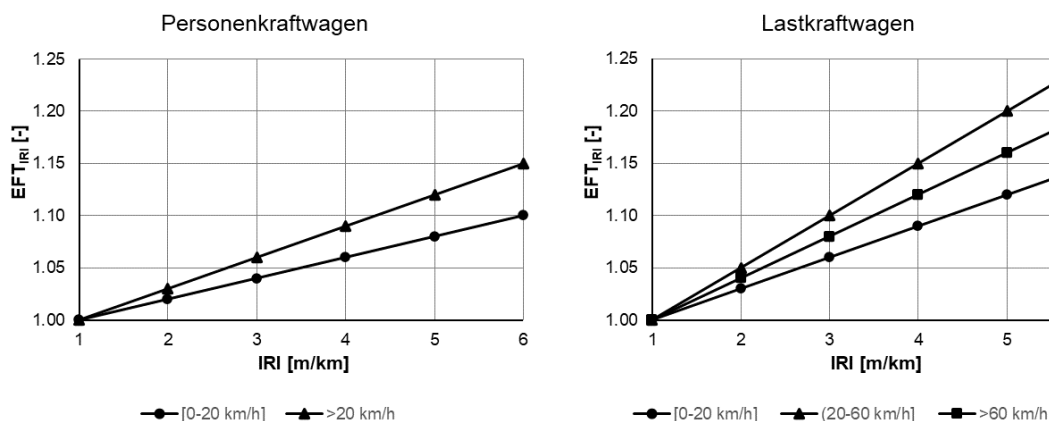


Abbildung 13: Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch EFT_{IRI}

Die Längsebenheit der Strasse wird normgemäss in Österreich über den IRI, in Deutschland über den AUN (Allgemeine Unebenheit) und in der Schweiz über den s_W -Wert beschrieben, sodass es für die Anwendung dieser Funktionen notwendig ist, diese auf den Parameter IRI umzurechnen. Dazu können die nachfolgenden, aus der Literatur hergeleiteten Funktionen verwendet werden.

Für die Umrechnung des in Deutschland verwendeten AUN-Wertes wird auf die umfangreichen Untersuchungen im Rahmen der Entwicklung des *Bewerteten Längsprofils* von Maerschalk et al. (2011) [85] zurückgegriffen. Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen AUN-Werten und IRI-Werten sind in Abbildung 14 für unterschiedliche Welligkeiten dargestellt. Da für die Berechnungen eine Vielzahl von Eingangsdaten notwendig sind, wird aus Gründen der Praktikabilität des SABINA-Bilanzrechners folgende vereinfachte Regressionsfunktion für eine mittlere Welligkeit von $w = 2.5$ verwendet:

$$IRI = 0.95 \cdot AUN^{0,5} \quad \text{Gl. 21}$$

mit

IRI..... IRI in [m/km]

AUN..... AUN in [cm³]

Ein Zusammenhang zwischen den in der Schweiz verwendeten s_W -Wert (Standardabweichung der Winkelwerte) zur Bewertung der Längsebenheit kann über die von Weninger-Vycudil (2001) [86] abgeleitete Beziehung zwischen IRI und Längsneigungsvarianz SV hergestellt werden.

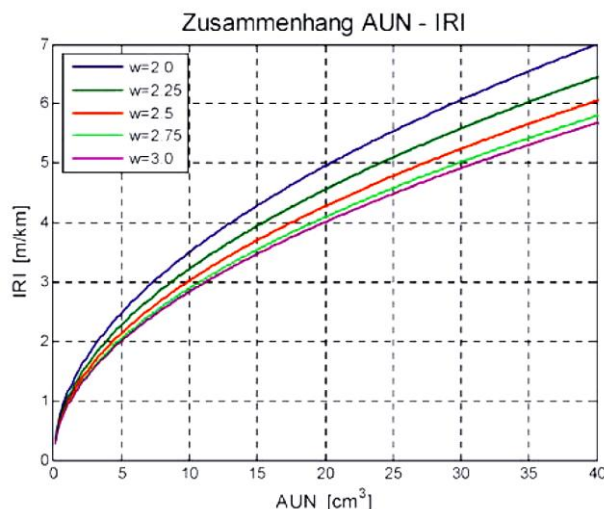


Abbildung 14: Zusammenhang AUN und IRI für verschiedene Welligkeiten nach [85]

Durch die Umrechnung der Varianz in die Standardabweichung haben Herrmann et al. (2008) [87] folgende Zusammenhänge hergestellt (Gl. 22, Gl. 23):

$$IRI_{As} = 5.5 \cdot \ln \frac{5.0}{5.03 - 1.91 \cdot \log(1 + s_w^2)} \quad \text{Gl. 22}$$

$$IRI_{Bet} = 5.5 \cdot \ln \frac{5.0}{5.41 - 1.80 \cdot \log(1 + s_w^2)} \quad \text{Gl. 23}$$

mit

IRI_{As} IRI Asphaltbauweise in [m/km]

IRI_{Bet} IRI Betonbauweise in [m/km]

s_w Standardabweichung der Winkelwerte [‰]

Mit diesen Umrechnungsfunktionen ist es möglich, sowohl die ZEB-Werte für die Längsebenheit aus Deutschland als auch aus der Schweiz im SABINA-Bilanzrechner zu verwenden und die zuvor beschriebenen Funktionen zur Berechnung des Treibstoff- bzw. Energieverbrauches heranzuziehen.

Obwohl in Österreich seit 2022 das bewertete Längsprofil als massgebendes Zustandsmerkmal für die Längsebenheit in den Richtlinien verankert ist, liegen bislang keine wissenschaftlich abgesicherten Korrelationen zwischen dem bewerteten Längsprofil und dem IRI vor. Die funktionalen Zusammenhänge werden daher in Österreich ausschliesslich über den IRI abgebildet.

6.1.4.4 Gesamter geschätzter Treibstoff- und Energieverbrauch

Um den gesamten Treibstoff- und Energieverbrauch bestimmen zu können, muss der vom IRI (bzw. AUN und s_w -Wert) abhängige Erhöhungsfaktor mit dem geschwindigkeitsabhängigen Treibstoff- und Energiefaktor multipliziert werden. Daraus lässt sich der gesamte Treibstoff- bzw. Energieverbrauch je 100 km Fahrstrecke wie folgt ermitteln (Gl. 24, Gl. 25 und Gl. 26):

$$T_{IRI,PKW,V} = EFT_{IRI,PKW,V} \cdot T_{PKW,V} \quad \text{Gl. 24}$$

$$T_{IRI,LKW,V} = EFT_{IRI,LKW,V} \cdot T_{LKW,V} \quad \text{Gl. 25}$$

$$T_{IRI,E-PKW,V} = EFT_{IRI,PKW,V} \cdot T_{E-PKW,V} \quad \text{Gl. 26}$$

mit

- $T_{IRI,PKW,V}$ Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie PKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V in [Liter/100km] (Ottokraftstoff)
- $T_{IRI,LKW,V}$ Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie LKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V in [Liter/100km] (Diesel)
- $T_{IRI,E-PKW,V}$ Energieverbrauch der Fahrzeugkategorie E-PKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V in [kWh/100km]
- $EFT_{IRI,PKW,V}$ Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie PKW aufgrund der Längsebenheit (IRI) und der Geschwindigkeit V
- $EFT_{IRI,LKW,V}$ Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie LKW aufgrund der Längsebenheit (IRI) und der Geschwindigkeit V
- $T_{PKW,V}$ Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie PKW bei der Geschwindigkeit V in [Liter/100km]
- $T_{LKW,V}$ Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie LKW bei der Geschwindigkeit V in [Liter/100km]
- $T_{E-PKW,V}$ Energieverbrauch der Fahrzeugkategorie E-PKW bei der Geschwindigkeit V in [kWh/100km]

Der Treibstoff- und Energieverbrauch kann mit diesen Funktionen für unterschiedliche Geschwindigkeiten berechnet werden:

- $V = V$ bei keiner Beeinträchtigung durch eine Massnahme oder Baustelle,
- $V = V_{Bau(PKW)}$ oder $V = V_{Bau(LKW)}$ bei Baustelle mit der Baustellengeschwindigkeit $V_{Bau(PKW)}$ für PKW und $V_{Bau(LKW)}$ für LKW,
- $V = V_{Stau}$, wenn auf dem Abschnitt Stau errechnet wurde.

Um den gesamten Treibstoff- bzw. Energieverbrauch aller Fahrzeuge einer Fahrzeugkategorie über die Dauer D (in Tagen) für den betrachteten Streckenabschnitt mit der Länge L [km] zu erhalten, wird der zuvor berechnete Wert mit der im Zeitraum vorhandenen Verkehrsbelastung der jeweiligen Fahrzeugkategorie multipliziert und entsprechend der Dauer D hochgerechnet (Gl. 27, Gl. 28 und Gl. 29):

$$T_{\text{ges,PKW,D,t,V}} = T_{\text{IRI,PKW,V}} \cdot DTV_{\text{PKW,t}} \cdot D \cdot \frac{L}{100} \quad \text{Gl. 27}$$

$$T_{\text{ges,LKW,D,t,V}} = T_{\text{IRI,LKW,V}} \cdot DTV_{\text{LKW,t}} \cdot D \cdot \frac{L}{100} \quad \text{Gl. 28}$$

$$T_{\text{ges,E-PKW,D,t,V}} = T_{\text{IRI,E-PKW,V}} \cdot DTV_{\text{E-PKW,t}} \cdot D \cdot \frac{L}{100} \quad \text{Gl. 29}$$

mit

$T_{\text{ges,PKW,D,t,V}}$ Gesamter Treibstoffverbrauch in [Liter] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) für die Dauer D zum Zeitpunkt (im Jahr) t und bei Geschwindigkeit V

$T_{\text{ges,LKW,D,t,V}}$ Gesamter Treibstoffverbrauch in [Liter] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) für die Dauer D zum Zeitpunkt (im Jahr) t und bei Geschwindigkeit V

$T_{\text{ges,E-PKW,D,t,V}}$ Gesamter Energieverbrauch in [Liter] der Fahrzeugkategorie E-PKW für die Dauer D zum Zeitpunkt (im Jahr) t und bei Geschwindigkeit V

$T_{\text{PKW,V}}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) bei der Geschwindigkeit V

$T_{\text{LKW,V}}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) bei der Geschwindigkeit V

$T_{\text{E-PKW,V}}$ Energieverbrauch in [kWh/100km] der Fahrzeugkategorie E-PKW bei der Geschwindigkeit V

$DTV_{\text{LKW,t}}$ Verkehrsstärke LKW zum Zeitpunkt t [LKW/24h]

$DTV_{\text{E-PKW,t}}$ Verkehrsstärke E-PKW zum Zeitpunkt t [E-PKW/24h]

$DTV_{\text{PKW,t}}$ Verkehrsstärke PKW (mit Verbrennungsmotor) zum Zeitpunkt t [PKW/24h]

D Dauer in Tagen [d]

L Länge des betrachteten Abschnitts in [km]

6.1.5 GWP-Auswirkungen durch Verkehrsbeeinträchtigung während einer Erhaltungsmassnahme

Während der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen kommt es zu Einschränkungen des Verkehrs. Ist die Leistungsfähigkeit des Streckenabschnittes stark eingeschränkt, kann zu-

sätzlicher Stau entstehen. Daraus resultiert ein erhöhter Ausstoss von CO₂ während der Stauzeiten, der in die Berechnung einzubeziehen ist. Von wesentlicher Bedeutung ist dabei die Ausgangssituation. Ergibt sich bereits ohne eine Erhaltungsmassnahme die Situation *Stau*, so sind nur die zusätzlichen Staustunden zu berücksichtigen, wie nachfolgend erläutert wird.

6.1.5.1 Stauzeiten ohne Verkehrseinschränkungen

Es ist für jede Erhaltungsmassnahme, ohne eine Einschränkung der Leistungsfähigkeit zu prüfen, in welchen Stunden Stauerscheinungen auftreten können. Hierfür wird die repräsentative (relative) Tagesganglinie sowie die maximale Kapazität bzw. Leistungsfähigkeit (ausgedrückt in KFZ/h) je Fahrstreifen mit dem vorhandenen Verkehr verglichen. Wenn in den Spitzenstunden die maximale Kapazität des betrachteten Querschnitts überschritten wird, entsteht auch ohne Einschränkungen ein Stau.

Die maximale Kapazität des Querschnitts wird durch die Multiplikation der maximalen Kapazität eines Fahrstreifens mit der Anzahl der Fahrspuren ermittelt. Die maximale Kapazität bzw. Leistungsfähigkeit eines Fahrstreifens ist eine Eingangsgrösse und wird durch die Anwenderin für den zu analysierenden Abschnitt definiert. Daraus lassen sich die täglichen Staustunden wie folgt ermitteln:

$$q_{t,h} > K_{FS} * n_{FS} \rightarrow H_{STAU,h} = 1 \quad \text{Gl. 30}$$

$$q_{t,h} \leq K_{FS} * n_{FS} \rightarrow H_{STAU,h} = 0$$

$$H_{STAU} = \sum_{h=1}^{24} H_{STAU,h}$$

mit

$q_{t,h}$ Stündliche Gesamtverkehrsstärke zum Zeitpunkt t in Stunde h [PKW/24h]

$H_{STAU,h}$ Staustunde in Stunde h [h]

H_{STAU} Anzahl an Staustunden [h]

K_{FS} maximale Kapazität pro Fahrstreifen ohne Einschränkung [KFZ/h]

n_{FS} Anzahl der Fahrstreifen pro Richtungsfahrbahn [-]

6.1.5.2 Zusätzliche Stauzeiten durch die Erhaltungsmassnahme

Durch einschränkende Massnahmen während der Baustelle wird im Regelfall auch die Kapazität entsprechend verringert, sodass in gleicher Weise die Berechnung der Stauzeiten wie

ohne Einschränkung erfolgen kann, jedoch mit einem geringen, von der Anwenderin zu definierenden Kapazitätswert. Darüber hinaus kann es zu einer Reduktion der Anzahl an Fahrstreifen kommen (in Abhängigkeit von einer bereits geplanten bzw. angenommenen möglichen Verkehrsführung). Dadurch kommt es zu den zusätzlichen Stauzeiten, wenn der vorhandene Verkehr die maximale Kapazität übersteigt (Gl. 31).

$$q_{t,h} > K_{FS,Bau} * n_{FS,Bau} \rightarrow H_{STAU,h,Bau} = 1 \quad \text{Gl. 31}$$

$$q_{t,h} \leq K_{FS,Bau} * n_{FS,Bau} \rightarrow H_{STAU,h,Bau} = 0$$

$$H_{STAU,Bau} = \sum_{h=1}^{24} H_{STAU,h,Bau}$$

mit

$q_{t,h}$ Stündliche Gesamtverkehrsstärke zum Zeitpunkt t in Stunde h [PKW/24h]

$H_{STAU,h,Bau}$ Staustunde durch Baumaßnahme in Stunde h [h]

$H_{STAU,Bau}$ Anzahl an Staustunden durch Baumaßnahme [h]

$K_{FS,Bau}$ maximale Kapazität pro Fahrstreifen mit Einschränkung durch Baumaßnahme [KFZ/h]

$n_{FS,Bau}$ Anzahl der Fahrstreifen pro Richtungsfahrbahn während der Baumaßnahme [-]

6.1.5.3 Änderung im Treibstoff- und Energieverbrauch

Durch die Massnahme und die damit verbundene Änderung der Geschwindigkeit ergeben sich entsprechende Änderungen im Treibstoff- bzw. Energieverbrauch. Dabei kann es durch die Reduktion der Geschwindigkeit auch zu einer Verringerung im Treibstoff- bzw. Energieverbrauch kommen. Es ist zu unterscheiden:

- Treibstoff- und Energiedifferenz (gegebenenfalls Einsparung) durch die Änderung der Geschwindigkeit im Baustellenbereich bei Baustellengeschwindigkeit V_{Bau} (kein Stau):

$$\Delta T_{PKW,V_{Bau}(PKW)} = T_{IRI,PKW,V} - T_{IRI,PKW,V_{Bau}(PKW)} \quad \text{Gl. 32}$$

$$\Delta T_{LKW,V_{Bau}(LKW)} = T_{IRI,LKW,V} - T_{IRI,LKW,V_{Bau}(LKW)} \quad \text{Gl. 33}$$

$$\Delta T_{E-PKW,V_{Bau}(PKW)} = T_{IRI,E-PKW,V} - T_{IRI,E-PKW,V_{Bau}(PKW)} \quad \text{Gl. 34}$$

mit

- $\Delta T_{PKW,VBau(PKW)}$ Differenz Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) durch Reduktion der Geschwindigkeit V auf Baustellengeschwindigkeit $VBau(PKW)$
- $T_{IRI,PKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V
- $T_{IRI,PKW,VBau(PKW)}$... Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Baustellengeschwindigkeit $VBau$ für PKW
- $\Delta T_{LKW,VBau(LKW)}$ Differenz Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) durch Reduktion der Geschwindigkeit V auf Baustellengeschwindigkeit $VBau(LKW)$
- $T_{IRI,LKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V
- $T_{IRI,LKW,VBau(LKW)}$... Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Baustellengeschwindigkeit $VBau$ für LKW
- $\Delta T_{E-PKW,VBau(PKW)}$.. Differenz Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW durch Reduktion der Geschwindigkeit V auf Baustellengeschwindigkeit $VBau(PKW)$
- $T_{IRI,E-PKW,V}$ Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V
- $T_{IRI,E-PKW,VBau(PKW)}$ Treibstoffverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Baustellengeschwindigkeit $VBau$ für PKW

- Zusätzliche Treibstoff- und Energiedifferenz durch die Änderung der Geschwindigkeit im Baustellenbereich von der Baustellengeschwindigkeit $VBau$ zur Staugeschwindigkeit:

$$Zus\Delta T_{PKW,VStau} = T_{IRI,PKW,VStau} - T_{IRI,PKW,VBau(PKW)} \quad \text{Gl. 35}$$

$$Zus\Delta T_{LKW,VStau} = T_{IRI,LKW,VStau} - T_{IRI,LKW,VBau(LKW)} \quad \text{Gl. 36}$$

$$Zus\Delta T_{E-PKW,VStau} = T_{IRI,E-PKW,VStau} - T_{IRI,E-PKW,VBau(PKW)} \quad \text{Gl. 37}$$

mit

$\text{zus}\Delta T_{\text{PKW},V\text{Stau}}$	zusätzliche Differenz Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) durch Stau bezogen auf die Baustellengeschwindigkeit $V_{\text{Bau}}(\text{PKW})$
$T_{\text{IRI},\text{PKW},V\text{Stau}}$	Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) in Abhängigkeit vom Zustand (IRI) und bei Staugeschwindigkeit V_{Stau}
$T_{\text{IRI},\text{PKW},V_{\text{Bau}}(\text{PKW})}$	Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Baustellengeschwindigkeit V_{Bau} für PKW
$\text{zus}\Delta T_{\text{LKW},V\text{Stau}}$	zusätzliche Differenz Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) durch Stau bezogen auf die Baustellengeschwindigkeit $V_{\text{Bau}}(\text{LKW})$
$T_{\text{IRI},\text{LKW},V\text{Stau}}$	Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) in Abhängigkeit vom Zustand (IRI) und bei Staugeschwindigkeit V_{Stau}
$T_{\text{IRI},\text{LKW},V_{\text{Bau}}(\text{LKW})}$	Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Baustellengeschwindigkeit V_{Bau} für LKW
$\text{zus}\Delta T_{\text{E-PKW},V\text{Stau}}$	zusätzliche Differenz Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW durch Stau bezogen auf die Baustellengeschwindigkeit $V_{\text{Bau}}(\text{PKW})$
$T_{\text{IRI},\text{E-PKW},V\text{Stau}}$	Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW in Abhängigkeit vom Zustand (IRI) und bei Staugeschwindigkeit V_{Stau}
$T_{\text{IRI},\text{E-PKW},V_{\text{Bau}}(\text{PKW})}$	Treibstoffverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Baustellengeschwindigkeit V_{Bau} für PKW

6.1.5.4 Treibstoffverbrauch während einer Massnahme

Für die Berechnung im SABINA-Bilanzrechner sind neben einer Einsparung durch eine Reduktion auf Baustellengeschwindigkeit V_{Bau} vor allem die zusätzlichen Stauzeiten von Bedeutung. Ergibt sich bereits ohne eine Massnahme ein Stau, so wird mit keinem zusätzlichen Treibstoff- und Energieverbrauch gerechnet. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, ist ein Vergleich der Staustunden ohne und mit Massnahme notwendig, wobei jede einzelne Stunde h eines Tages betrachtet werden muss. Dabei spielt auch die Geschwindigkeit eine massgebende Rolle, da der Treibstoffverbrauch wesentlich von dieser abhängig ist. Die Ebenheit während der Massnahmen – ausgedrückt über die Längsebenheit (IRI) – entspricht dabei

aus Gründen der Vereinfachung dem IRI vor der Massnahme.

Für eine Stunde h eines Tages der Baumaßnahme ergibt sich folgender zusätzlicher Treibstoff- bzw. Energieverbrauch im Bereich der Baustelle. Der zusätzliche Treibstoff- bzw. Energieverbrauch (mit Bezug zur Baustellengeschwindigkeit) ergibt sich nur dann, wenn in der Stunde h auch Stau errechnet wurde, sonst ist dieser Anteil gleich 0:

$$H_{\text{STAU},h} = 1 \rightarrow \text{zus}T_{h,\text{PKW},t} = 0 \quad \text{sonst} \quad \text{Gl. 38}$$

$$\text{zus}T_{h,\text{PKW},t} = \frac{\Delta T_{\text{PKW},\text{VBau}(\text{PKW})} + \text{zus}\Delta T_{\text{PKW},\text{VStau}} \cdot H_{\text{STAU},h,\text{Bau}}}{100} \cdot L \cdot \text{DTV}_{\text{PKW},t} \cdot \frac{p_{\text{TGL},h}}{100}$$

$$H_{\text{STAU},h} = 1 \rightarrow \text{zus}T_{h,\text{LKW},t} = 0 \quad \text{sonst} \quad \text{Gl. 39}$$

$$\text{zus}T_{h,\text{LKW},t} = \frac{\Delta T_{\text{LKW},\text{VBau}(\text{LKW})} + \text{zus}\Delta T_{\text{LKW},\text{VStau}} \cdot H_{\text{STAU},h,\text{Bau}}}{100} \cdot L \cdot \text{DTV}_{\text{LKW},t} \cdot \frac{p_{\text{TGL},h}}{100}$$

$$H_{\text{STAU},h} = 1 \rightarrow \text{zus}T_{h,\text{E-PKW},t} = 0 \quad \text{sonst} \quad \text{Gl. 40}$$

$$\text{zus}T_{h,\text{E-PKW},t} = \frac{\Delta T_{\text{E-PKW},\text{VBau}(\text{PKW})} + \text{zus}\Delta T_{\text{E-PKW},\text{VStau}} \cdot H_{\text{STAU},h,\text{Bau}}}{100} \cdot L \cdot \text{DTV}_{\text{E-PKW},t} \cdot \frac{p_{\text{TGL},h}}{100}$$

$\text{zus}T_{h,\text{PKW},t}$ zusätzliche Treibstoffverbrauch in [Liter] in Stunde h der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) durch die Baustelle zum Zeitpunkt t

$\text{zus}T_{h,\text{LKW},t}$ zusätzliche Treibstoffverbrauch in [Liter] in Stunde h der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) durch die Baustelle zum Zeitpunkt t

$\text{zus}T_{h,\text{E-PKW},t}$ zusätzlicher Energieverbrauch in [kWh] in Stunde h der Fahrzeugkategorie E-PKW durch die Baustelle zum Zeitpunkt t

$\Delta T_{\text{PKW},\text{VBau}(\text{PKW})}$.. Differenz Treibstoffverbrauch in [Liter] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) durch Reduktion der Geschwindigkeit V auf die Baustellengeschwindigkeit $\text{VBau}(\text{PKW})$

$\Delta T_{\text{LKW},\text{VBau}(\text{LKW})}$.. Differenz Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) durch Reduktion der Geschwindigkeit V auf die Baustellengeschwindigkeit $\text{VBau}(\text{LKW})$

$\Delta T_{\text{E-PKW},\text{VBau}(\text{PKW})}$ Differenz Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW durch Reduktion der Geschwindigkeit V auf die Baustellengeschwindigkeit $\text{VBau}(\text{PKW})$

$\text{zus}\Delta T_{\text{PKW},\text{VStau}}$.. zusätzlicher Differenz Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) durch Stau bezogen auf die Baustellengeschwindigkeit $\text{VBau}(\text{PKW})$

$\text{zus}\Delta T_{\text{LKW},V\text{Stau}}$... zusätzliche Differenz Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) durch Stau bezogen auf die Baustellengeschwindigkeit $V_{\text{Bau}}(\text{LKW})$
 $\text{zus}\Delta T_{\text{E-PKW},V\text{Stau}}$ zusätzliche Differenz Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW durch Stau bezogen auf die Baustellengeschwindigkeit $V_{\text{Bau}}(\text{PKW})$
 $\text{DTV}_{\text{LKW},t}$ Verkehrsstärke LKW zum Zeitpunkt t [LKW/24h]
 $\text{DTV}_{\text{E-PKW},t}$ Verkehrsstärke E-PKW zum Zeitpunkt t [E-PKW/24h]
 $\text{DTV}_{\text{PKW},t}$ Verkehrsstärke PKW (mit Verbrennungsmotor) zum Zeitpunkt t [PKW/24h]
 L Länge des betrachteten Abschnitts in [km]

Der gesamte zusätzliche Treibstoff- und Energieverbrauch ergibt sich durch die Summierung über die Stunden des Tages und die Dauer der Massnahme bzw. Baustelle, wobei zusätzlich die Beeinträchtigung der Gegenfahrtrichtung über einen Erhöhungsfaktor zu berücksichtigen ist:

$$\text{zus}T_{\text{gesamt},\text{PKW},t} = D_M \cdot \left(1 + \frac{\text{EinschGRFB}}{100}\right) \cdot \sum_{h=1}^{24} \text{zus}T_{h,\text{PKW},t} \quad \text{Gl. 41}$$

$$\text{zus}T_{\text{gesamt},\text{LKW},t} = D_M \cdot \left(1 + \frac{\text{EinschGRFB}}{100}\right) \cdot \sum_{h=1}^{24} \text{zus}T_{h,\text{LKW},t} \quad \text{Gl. 42}$$

$$\text{zus}T_{\text{gesamt},\text{E-PKW},t} = D_M \cdot \left(1 + \frac{\text{EinschGRFB}}{100}\right) \cdot \sum_{h=1}^{24} \text{zus}T_{h,\text{E-PKW},t} \quad \text{Gl. 43}$$

mit

$\text{zus}T_{\text{gesamt},\text{PKW},t}$... zusätzlicher gesamter Treibstoffverbrauch [in Liter] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) durch die Baustelle während der Baustellendauer D zum Zeitpunkt t

$\text{zus}T_{\text{gesamt},\text{LKW},t}$... zusätzlicher gesamter Treibstoffverbrauch [in Liter] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) durch die Baustelle während der Baustellendauer D zum Zeitpunkt t

$\text{zus}T_{\text{gesamt},\text{E-PKW},t}$ zusätzlicher gesamter Energieverbrauch in [kWh] der Fahrzeugkategorie E-PKW durch die Baustelle während der Baustellendauer D zum Zeitpunkt t

$\text{zus}T_{h,\text{PKW},t}$ zusätzliche Treibstoffverbrauch [in Liter] in Stunde h der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) durch die Baustelle zum Zeitpunkt t

$\text{zus}T_{h,\text{LKW},t}$ zusätzliche Treibstoffverbrauch [in Liter] in Stunde h der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) durch die Baustelle zum Zeitpunkt t

$\text{zus}T_{h,\text{E-PKW},t}$ zusätzliche Energieverbrauch [in kWh] in Stunde h der Fahrzeugkategorie E-PKW durch die Baustelle zum Zeitpunkt t

D_M Dauer der Massnahme in Tagen [d]

EinschGRFB ... Einschränkung Gegenrichtungsfahrbahn in [%] der Normalsituation

Die Dauer der Massnahme bzw. der Baustelle D ergibt sich aus der geplanten Abschnittslänge, der Breite der Fahrbahn bzw. der durch die Massnahme betroffenen Querschnittsbreite und der Produktivität der ausgewählten Baumassnahme. Zusätzlich müssen der Auf- und Abbau der Baustelle bzw. der Baustelleneinrichtung in Abhängigkeit von der Länge berücksichtigt werden (Gl. 44).

$$D = L \cdot 1000 \cdot \frac{B}{P_M} + 2 \cdot d_{\text{Eintr}} \cdot L \quad \text{Gl. 44}$$

mit

D Dauer der Baustelle / Massnahme in Tage [d]

L Abschnittslänge in [km]

B Breite Fahrbahn bzw. durch Massnahme betroffene Breite [m]

P_M Produktivität der Massnahme M in [m^2/d]

d_{Eintr} Dauer des Auf- und Abbaus der Baustelle in [d/km]

Die Einschränkung der Gegenrichtungsfahrbahn (GRFB) durch die Baustelle bzw. Massnahme hängt wesentlich von der gewählten Verkehrsführung und einer gegebenenfalls damit verbundenen Überleitung des Verkehrs auf die Gegenrichtungsfahrbahn ab. Bei kurzfristig geplanten Projekten sollte diese Information zur Verfügung stehen, bei Massnahmen, die möglicherweise erst in vielen Jahren zur Ausführung gelangen, kann im Regelfall eine wahrscheinlichste Verkehrsführung angenommen werden. Tabelle 17 ist eine Empfehlung für die Wahl der Einschränkung der Gegenrichtungsfahrbahn (in %) in Abhängigkeit von der geplanten Verkehrsführung.

Tabelle 17: Einschränkung auf Gegenrichtungsfahrbahn

Beschreibung	Einschränkung Gegenrichtungsfahrbahn (EinschGRFB) [%]
Keine Einschränkung auf Gegenrichtungsfahrbahn	0 %
Gleiche Einschränkung wie auf RFB mit Massnahme (Anzahl FStr. und Geschwindigkeit): - Bei 2 Fahrstreifen je Richtung: 2 (↓↑) + 0 (xx), 3 (↓↓↑) + 1 (↑x), 4 (↓↓↑↑) + 0 (xx) - Bei 3 Fahrstreifen je Richtung: 5 (↓↓↓↑) + 1 (↑xx), 4 (↓↓↓↑) + 2 (↑↑x)	100 %
Anzahl der Fahrstreifen wird im Vergleich zur RFB mit Massnahme nicht reduziert, jedoch Reduktion der Geschwindigkeit und der Fahrstreifenbreite (z. B. durch Umleitung eines Fahrstreifens von der RFB mit Massnahme auf die GRFB): - Bei 2 Fahrstreifen je Richtung: 3 (↓↓↑) + 0 (xxx) - Bei 3 Fahrstreifen je Richtung: 4 (↓↓↓↑) + 1 (↑xx)	50 %
Anzahl der Fahrstreifen wird nur auf Gegenrichtungsfahrbahn reduziert: - Bei 2 Fahrstreifen je Richtung: 3 (↓↑↑) + 0 (xxx) - Bei 3 Fahrstreifen je Richtung: 4 (↓↓↑↑) + 1 (↑xx)	150 %

↓ Fahrstreifen auf Gegenrichtungsfahrbahn

↑ Fahrstreifen auf Richtungsfahrbahn mit Massnahme / Baustelle

6.1.5.5 GWP durch Verkehrsbeeinträchtigung während der Erhaltungsmassnahme

Für die Berechnung des gesamten GWP während der Erhaltungsmassnahme müssen in einem letzten Schritt die auf einzelne Fahrzeugkategorien bezogenen zusätzlichen Treibstoff- und Energieverbräuche summiert werden:

$$GWP_{VE,M,t} = \text{zus}T_{\text{gesamt,PKW},t} \cdot GWP_{\text{Otto}} + \text{zus}T_{\text{gesamt,LKW},t} \cdot GWP_{\text{Diesel}} + \text{zus}T_{\text{gesamt,E-PKW},t} \cdot GWP_{\text{Strom}} \quad \text{Gl. 45}$$

mit

$GW_{VE,M,t}$ GWP in [kg-CO₂-äq] durch Verkehrsbeeinträchtigung der Massnahme M zum Zeitpunkt (Jahr) t

$\text{zus}T_{\text{gesamt,PKW},t}$.. zusätzlicher gesamter Treibstoffverbrauch in [Liter] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) durch die Baustelle während der Baustellendauer D zum Zeitpunkt t

$\text{zus}T_{\text{gesamt,LKW},t}$.. zusätzlicher gesamter Treibstoffverbrauch in [Liter] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) durch die Baustelle während der Baustellendauer D zum Zeitpunkt t

$\text{zus}T_{\text{gesamt,E-PKW},t}$.. zusätzlicher gesamter Energieverbrauch in [kWh] der Fahrzeugkategorie E-PKW durch die Baustelle während der Baustellendauer D zum Zeitpunkt t

GWP_{Otto} GWP-Emissionsfaktor Ottokraftstoff in [kg-CO₂-äq]
 GWP_{Diesel} GWP-Emissionsfaktor Diesel in [kg-CO₂-äq]
 GWP_{trom} GWP-Emissionsfaktor gewählter Strommix in [kg-CO₂-äq]

6.1.6 Einsparungen GWP durch eine Verbesserung des Strassenzustands

6.1.6.1 Lebenszyklus und Intervalle

Die in Kapitel 6.1.4 beschriebenen Zusammenhänge zwischen dem Strassenzustand, ausgedrückt über die Längsebenheit (IRI, AUN oder s_w), und dem Treibstoff- bzw. Energieverbrauch ermöglichen auch eine Abschätzung der Wirkungen infolge Zustandsverbesserung bis zur nächsten Erhaltungsmassnahme, sofern eine Verbesserung des Strassenzustands quantifizierbar ist. Grundlage für den Vergleich ist die Differenz der Längsebenheit zwischen dem *Nichts-Tun* und der Massnahmenwirkung in jedem Jahr des Betrachtungszeitraums. Da der gesamte Lebenszyklus betrachtet wird (vom Jahr $t = 0$ bis zum Jahr $t = t_E$) müssen gegebenenfalls mehrere Massnahmen M_i berücksichtigt werden. Dies bedeutet, dass eine eventuelle Wirkung zwischen zwei Massnahmen in den jeweiligen Intervallen auch unterschiedlich sein kann.

6.1.6.2 Zustandsprognose Längsebenheit

Eine wesentliche Voraussetzung für die Beurteilung der Wirkungen ist die Prognose der Längsebenheit. Dabei wird aus Gründen der Vereinfachung auf ein lineares Modell zurückgegriffen, wo die Anwenderin die jährliche Änderung des jeweils gewählten Längsebenheitswertes (bis zur nächsten Massnahme M_{i+1}) angeben kann.

Durch die in Kapitel 6.1.4 beschriebenen Zusammenhänge zwischen IRI, AUN und s_w können alle Kenngrössen durch den IRI-Wert ausgedrückt werden. Für die Zustandsprognose werden der *Fall mit Massnahme* und der *Fall ohne Massnahme* unterschieden:

- Zustandsprognose Längsebenheit mit Massnahme M_i :

$$IRI_{nM,i,t} = RW_{IRI,i} \quad \text{für } t = t_{M,i} \quad \text{Gl. 46}$$

$$IRI_{nM,i,t+1} = IRI_{nM,i,t} + \Delta IRI_{nM,i} \quad \text{für } [t_M < t < t_{M,i+1}] \quad \text{Gl. 47}$$

mit

$IRI_{nM,i,t}$ IRI in [m/km] nach i-ter Massnahme zum Zeitpunkt t

$RW_{IRI,i}$ Rücksetzwert IRI in [m/km] direkt nach i-ter Massnahme
 t Zeitpunkt [Jahr] im Lebenszyklus
 $t_{M,i}$ Zeitpunkt [Jahr] des Durchführen der i-ten Massnahme
 $IRI_{nM,i,t+1}$ IRI in [m/km] nach i-ter Massnahme zum Zeitpunkt t+1
 $\Delta IRI_{nM,i}$ Jährliche Änderung IRI in [m/km] nach i-ter Massnahme
 $t_{M,i+1}$ Zeitpunkt [Jahr] des Durchführen der i+1-ten Massnahme

- Zustandsprognose Längsebenheit ohne Massnahme M_i (Nichts-Tun-Verlauf):

$$IRI_{oM,t+1} = IRI_{oM,t} + \Delta IRI_{oM} \quad \text{für } [t_M \leq t < t_{M,i+1}] \quad \text{Gl. 48}$$

mit

$IRI_{oM,t}$ IRI in [m/km] ohne Massnahme zum Zeitpunkt t
 t Zeitpunkt [Jahr] im Lebenszyklus
 $t_{M,i}$ Zeitpunkt [Jahr] des Durchführen der i-ten Massnahme
 $IRI_{oM,t+1}$ IRI in [m/km] ohne Massnahme zum Zeitpunkt t+1
 ΔIRI_{oM} Jährliche Änderung IRI in [m/km] ohne Massnahme
 $t_{M,i+1}$ Zeitpunkt [Jahr] des Durchführen der i+1-ten Massnahme

6.1.6.3 Geschätzter Treibstoff- und Energieverbrauch

Ist der IRI-Wert sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Massnahmen zu jedem Zeitpunkt t bekannt, kann unter Heranziehung der nachfolgenden Funktionen die Einsparung in Treibstoff bzw. Energie für die beiden oben beschriebenen Fälle berechnet werden:

- Der Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit von Zustand und Geschwindigkeit nach der Massnahme errechnet sich für die unterschiedlichen Fahrzeugkategorien wie folgt:

$$T_{IRI(nM,i,t),PKW,V} = EFT_{IRI(nM,i,t),PKW,V} \cdot T_{PKW,V} \quad \text{Gl. 49}$$

$$T_{IRI(nM,i,t),LKW,V} = EFT_{IRI(nM,i,t),LKW,V} \cdot T_{LKW,V} \quad \text{Gl. 50}$$

$$T_{IRI(nM,i,t),E-PKW,V} = EFT_{IRI(nM,i,t),PKW,V} \cdot T_{E-PKW,V} \quad \text{Gl. 51}$$

mit

$T_{IRI(nM,i,t),PKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t mit Massnahme M_i
 $T_{IRI(nM,i,t),LKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) in

Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t mit Massnahme M_i

$T_{IRI(nM,i,t),E-PKW,V}$ Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t mit Massnahme M_i

$EFT_{IRI(nM,i,t),PKW,V}$ Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie PKW aufgrund der Längsebenheit (IRI) und der Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t mit Massnahme M_i

$EFT_{IRI(nM,i,t),LKW,V}$ Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie LKW aufgrund der Längsebenheit (IRI) und der Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t mit Massnahme M_i

$T_{PKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW bei der Geschwindigkeit V

$T_{LKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW bei der Geschwindigkeit V in

$T_{E-PKW,V}$ Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW bei der Geschwindigkeit V

- Der Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit von Zustand und Geschwindigkeit ohne Massnahme errechnet sich für die unterschiedlichen Fahrzeugkategorien wie folgt:

$$T_{IRI(oM,t),PKW,V} = EFT_{IRI(oM,t),PKW,V} \cdot T_{PKW,V} \quad \text{Gl. 52}$$

$$T_{IRI(oM,t),LKW,V} = EFT_{IRI(oM,t),LKW,V} \cdot T_{LKW,V} \quad \text{Gl. 53}$$

$$T_{IRI(oM,t),E-PKW,V} = EFT_{IRI(oM,t),PKW,V} \cdot T_{E-PKW,V} \quad \text{Gl. 54}$$

mit

$T_{IRI(oM,t),PKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t ohne Massnahme

$T_{IRI(oM,t),LKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t ohne Massnahme

$T_{IRI(oM,t),E-PKW,V}$ Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t ohne Massnahme

- $EFT_{IRI(oM,t),PKW,V}$ Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie PKW aufgrund der Längsebenheit (IRI) und der Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t ohne Massnahme
- $EFT_{IRI(oM,t),LKW,V}$ Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch der Fahrzeugkategorie LKW aufgrund der Längsebenheit (IRI) und der Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t ohne Massnahme
- $T_{PKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW bei der Geschwindigkeit V
- $T_{LKW,V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW bei der Geschwindigkeit V
- $T_{E-PKW,V}$ Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW bei der Geschwindigkeit V

Die massgebende Einflussgrösse ist auch hier die Verkehrsbelastung. Dabei ist wieder die zeitliche Änderung der Verkehrsbelastung zu berücksichtigen, wobei in diesem Fall kein Ausweichverkehr (durch Massnahme bzw. Baustelle) zu berücksichtigen ist.

$$DTV_{E-PKW,t} = (DTV_t - DTLV_t) \cdot \frac{Ant_{E-PKW,t}}{100} \quad \text{Gl. 55}$$

$$DTV_{PKW,t} = DTV_t - DTLV_t - DTV_{E-PKW,t} \quad \text{Gl. 56}$$

$$DTV_{LKW,t} = DTLV_t \quad \text{Gl. 57}$$

mit

- DTV_t Gesamtverkehrsstärke zum Zeitpunkt t (aktueller Zeitpunkt) [KFZ/24h]
- $DTLV_t$ Schwerverkehrsstärke zum Zeitpunkt t [LKW/24h]
- $DTV_{E-PKW,t}$ Verkehrsstärke E-PKW zum Zeitpunkt t [E-PKW/24h]
- $DTV_{PKW,t}$ Verkehrsstärke PKW (mit Verbrennungsmotor) zum Zeitpunkt t [PKW/24h]
- $DTV_{LKW,t}$ Verkehrsstärke LKW zum Zeitpunkt t [LKW/24h]
- $Ant_{E-PKW,t}$ Anteil E-PKW am PKW-Verkehr zum Zeitpunkt t [%]

Über die jährliche Differenz und die Summierung über alle Intervalle bzw. Massnahmen M_i im Lebenszyklus kann für jede Fahrzeugkategorie die Einsparung berechnet werden. Um den Vergleich mit dem zusätzlichen Treibstoff- und Energieverbrauch infolge einer Massnahme bzw. Baustelle zu ermöglichen, werden die Einsparungen mit einem *negativen* Vorzeichen für jede Fahrzeugkategorie berechnet. Für das Ende des letzten Intervalls im Lebenszyklus gilt das Ende der Betrachtungs- bzw. Analyseperiode ($t_{M,i+1-1} = t_E$):

$$\Delta T_{\text{gesamt,PKW}} = \sum_{i=1}^j \sum_{t=t_{M,i}}^{t_{M,i+1}-1} \frac{T_{\text{IRI}(nM,i,t),\text{PKW},V} - T_{\text{IRI}(oM,t),\text{PKW},V}}{100} \cdot L \cdot \text{DTV}_{\text{PKW},t} \cdot 365 \quad \text{Gl. 58}$$

$$\Delta T_{\text{gesamt,LKW}} = \sum_{i=1}^j \sum_{t=t_{M,i}}^{t_{M,i+1}-1} \frac{T_{\text{IRI}(nM,i,t),\text{LKW},V} - T_{\text{IRI}(oM,t),\text{LKW},V}}{100} \cdot L \cdot \text{DTV}_{\text{LKW},t} \cdot 365 \quad \text{Gl. 59}$$

$$\Delta T_{\text{gesamt,E-PKW}} = \sum_{i=1}^j \sum_{t=t_{M,i}}^{t_{M,i+1}-1} \frac{T_{\text{IRI}(nM,i,t),\text{E-PKW},V} - T_{\text{IRI}(oM,t),\text{E-PKW},V}}{100} \cdot L \cdot \text{DTV}_{\text{E-PKW},t} \cdot 365 \quad \text{Gl. 60}$$

mit

$\Delta T_{\text{gesamt,PKW}}$ Einsparung Treibstoffverbrauch gesamt der Fahrzeugkategorie PKW in [Liter] (Ottokraftstoff) während des gesamten Lebenszyklus

$\Delta T_{\text{gesamt,LKW}}$ Einsparung Treibstoffverbrauch gesamt der Fahrzeugkategorie LKW in [Liter] (Diesel) während des gesamten Lebenszyklus

$\Delta T_{\text{gesamt,E-PKW}}$ Einsparung Energieverbrauch gesamt der Fahrzeugkategorie E-PKW in [kWh] während des gesamten Lebenszyklus

$T_{\text{IRI}(nM,i,t),\text{PKW},V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t mit Massnahme M_i

$T_{\text{IRI}(nM,i,t),\text{LKW},V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t mit Massnahme M_i

$T_{\text{IRI}(nM,i,t),\text{E-PKW},V}$ Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t mit Massnahme M_i

$T_{\text{IRI}(oM,t),\text{PKW},V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie PKW (Ottokraftstoff) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t ohne Massnahme

$T_{\text{IRI}(oM,t),\text{LKW},V}$ Treibstoffverbrauch in [Liter/100 km] der Fahrzeugkategorie LKW (Diesel) in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t ohne Massnahme

$T_{\text{IRI}(oM,t),\text{E-PKW},V}$ Energieverbrauch in [kWh/100 km] der Fahrzeugkategorie E-PKW in Abhängigkeit von Zustand (IRI) und Geschwindigkeit V zum Zeitpunkt t ohne Massnahme

$\text{DTV}_{\text{E-PKW},t}$ Verkehrsstärke E-PKW zum Zeitpunkt t [E-PKW/24h]

$DTV_{PKW,t}$	Verkehrsstärke PKW (mit Verbrennungsmotor) zum Zeitpunkt t [PKW/24h]
$DTV_{LKW,t}$	Verkehrsstärke LKW zum Zeitpunkt t [LKW/24h]
L	Länge Abschnitt in [km]
$t_{M,i}$	Zeitpunkt des Durchführens der i-ten Massnahme [Jahr]
$t_{M,i+1}$	Zeitpunkt des Durchführens der i+1-ten Massnahme [Jahr]
i.....	Laufzeitvariable für Massnahmen [-]

6.1.6.4 GWP-Einsparungen

Für die Berechnung der gesamten Einsparungen, ausgedrückt über das GWP, müssen die auf einzelne Fahrzeugkategorien bezogenen eingesparten Treibstoff- und Energieressourcen summiert werden (Gl. 61). Wieder ist bei einer errechneten Einsparung dieser Wert negativ.

$$GWP_{ZU,N} = \Delta T_{gesamt,PKW} \cdot GWP_{Otto} + \Delta T_{gesamt,LKW} \cdot GWP_{Diesel} + \Delta T_{gesamt,E-PKW} \cdot GWP_{Strom} \quad \text{Gl. 61}$$

mit

$GW_{ZU,N}$	Einsparung GWP durch einen verbesserten Strassenzustand (über den gesamten Lebenszyklus) in [kg-CO ₂ -äq]
$\Delta T_{gesamt,PKW}$	Einsparung Treibstoffverbrauch gesamt der Fahrzeugkategorie PKW in [Liter] (Ottokraftstoff) während des gesamten Lebenszyklus
$\Delta T_{gesamt,LKW}$	Einsparung Treibstoffverbrauch gesamt der Fahrzeugkategorie LKW in [Liter] (Dieselkraftstoff) während des gesamten Lebenszyklus
$\Delta T_{gesamt,E-PKW}$	Einsparung Energieverbrauch gesamt der Fahrzeugkategorie E-PKW in [kWh] während des gesamten Lebenszyklus
GWP_{Otto}	GWP-Emissionsfaktor Ottokraftstoff in [kg-CO ₂ -äq]
GWP_{Diesel}	GWP-Emissionsfaktor Diesel in [kg-CO ₂ -äq]
GWP_{strom}	GWP-Emissionsfaktor gewählter Strommix in [kg-CO ₂ -äq]

6.1.7 Abschätzung des Unfallgeschehens bei Erhaltungsmassnahmen

Entsprechend den Vorgaben aus der Analyse des Untersuchungsrahmens ist es notwendig, die Auswirkungen der Massnahme bzw. Baustelle auf das Unfallgeschehen abzuschätzen. Grundsätzlich soll eine Abschätzung der (theoretischen) zusätzlichen Unfälle und der damit verbundenen (theoretischen) zusätzlichen Unfallkosten die Entscheidungsgrundlage darstellen. Die massgebende Kenngrösse ist dabei die Unfallrate bzw. die Differenz der Unfallraten ohne und mit Verkehrseinschränkung durch die Massnahme.

Speziell die Unfallrate im Baustellen- und Annäherungsbereich ist in Abhängigkeit von der

Verkehrsführung, der Länge Baustelle und der Geschwindigkeit die massgebende Eingangsgrösse. Die Anwenderin hat die Möglichkeit, diese Kennwerte in den SABINA-Bilanzrechner einzugeben. Für die Berechnung der zusätzlichen Unfallkosten müssen daher die erforderlichen Unfallkostensätze eingegeben bzw. berücksichtigt werden.

Die Unfallrate UR für eine Strecke mit der Länge L ergibt sich aus der Zahl der Unfälle je Jahr (U/J) bezogen auf die Verkehrsstärke DTV (Unfälle je 1 Mio. Kfz) und auf 1 km Strassenlänge (siehe RVS 02.02.21 [88]):

$$UR = \frac{U/J \cdot 10^6}{365 \cdot DTV \cdot L} \quad \text{Gl. 62}$$

mit

UR Unfallrate in [Unfälle/(Mio. KFZ-km)]

U/J Unfälle pro Jahr

L Länge des betrachteten Streckenabschnitts in [km]

DTV Verkehrsstärke in [KFZ/24h]

Da sowohl die *Länge* L als auch die *Dauer* D_M der Massnahme diesen Wert bestimmen, kann unter Heranziehung dieser Eingangswerte eine Abschätzung über die Anzahl der theoretisch stattfindenden Unfälle aus der Differenz der Unfallraten vorgenommen werden, vorausgesetzt, dass die Unfallraten in beiden Fällen bekannt sind bzw. abgeschätzt werden können. Für eine bestimmte Dauer und Länge eines Abschnittes ergibt sich die Zahl der theoretisch zusätzlichen Unfälle ΔU bei bekannten Unfallraten vor und während der Massnahme wie folgt:

$$\Delta U_{M,t} = (UR_M - UR_{oM}) \cdot DTV_t \cdot L \cdot D_M \cdot 10^{-6} \quad \text{Gl. 63}$$

mit

ΔU_{M,t} theoretisch zusätzliche Unfälle während der Massnahme M zum Zeitpunkt t [Unfälle]

UR_M Unfallrate während der Massnahme in [Unfälle/(Mio. KFZ-km)]

UR_{oM} Unfallrate ohne Massnahme in [Unfälle/(Mio. KFZ-km)]

DTV_t Verkehrsstärke zum Zeitpunkt in [KFZ/24h]

L Länge des betrachteten Streckenabschnitts in [km]

D_M Dauer der Massnahme in Tagen [d]

Die zusätzlichen Unfallkosten ergeben sich durch die Multiplikation mit einem mittleren Unfallkostensatz. Die Berücksichtigung einer entsprechenden Hochrechnung der Kosten in das

Jahr t erfolgt über die gesamte technische Nutzungsdauer bzw. Betrachtungsperiode zur Berechnung der massgebenden Indikatoren (siehe hierzu Kapitel 6.2.3):

$$\Delta KST_{U,t} = \Delta U_t \cdot KST_{U,0} \quad \text{Gl. 64}$$

mit

$\Delta KST_{U,t}$ zusätzliche Unfallkosten während der Massnahme zum Zeitpunkt t in [€] oder [CHF]

ΔU_t Unfälle während der Massnahme zum Zeitpunkt t

$KST_{U,0}$ aktueller mittlerer Unfallkostensatz in [€] oder [CHF]

Für die Abschätzung der notwendigen Unfallraten bei bestimmten Baustellenverkehrsführungen kann auf umfassende Untersuchungen im Rahmen des Bundesverkehrswegeplan 2003 in Deutschland [88] sowie auf das österreichische Forschungsprojekt *Entwicklung eines Nutzerkostenmoduls für das österreichische PMS* (Brozek et al., 2009 [89]) zurückgegriffen werden. Tabelle 18 liefert einen Vorschlag für unterschiedliche Unfallraten aus der zitierten Literatur sowie auf der Grundlage von statistischen Auswertungen von Strassenverkehrsunfällen und Verkehrssicherheitsprogrammen in Deutschland (BASt [90]) und in Österreich (ASFINAG [91]). Dabei handelt es sich um Unfälle mit Personenschäden.

Tabelle 18: Beispiele für Unfallraten auf Autobahnen

Verkehrssituation	Unfallrate [Unfälle/(Mio.KFZ-km)]
Freie Strecke (Autobahn)	0.07 – 0.10
Baustelle ohne Beeinträchtigung des Gegenverkehrs	0.20 – 0.25
Baustelle mit Beeinträchtigung des Gegenverkehrs	0.20 – 0.30

Die Unfallkostensätze sind in den Ländern sehr unterschiedlich, wobei im jeweiligen Projekt auf aktuelle Werte zurückgegriffen werden sollte. Auch die Frage nach der Berücksichtigung des menschlichen Leids ist in diese Überlegungen miteinzubeziehen. Unter Bezugnahme auf Untersuchungen von Brozek et al., 2009 [89] mit Daten und Grundlagen aus Deutschland und Österreich liegt der mittlere Unfallkostensatz im Jahr 2009 bei 88'400 €/Unfall, ohne Berücksichtigung des menschlichen Leids, und bei 220'000 €/Unfall mit monetärer Bezifferung des menschlichen Leids. Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Inflationsrate von 2 % ergibt sich für 2024 eine Erhöhung von ca. 33 %, sodass ein Unfallkostensatz von ca. 118'000 €/Unfall, ohne Berücksichtigung des menschlichen Leids und von ca. 293'000 €/Unfall

mit Berücksichtigung des menschlichen Leids angesetzt werden kann, sofern nicht andere Daten zur Verfügung stehen.

6.2 Bilanzmodelle und Vergleichsindikatoren

Auftragsgemäss soll eine Bilanzierung über den gesamten Lebenszyklus vorgenommen werden. Dies bedeutet, dass sämtliche Auswirkungen – sowohl Einsparungen als auch zusätzliche Ressourcen – berücksichtigt werden müssen.

Unter Bezugnahme auf den vordefinierten Untersuchungsrahmen erfolgt die Bilanzierung in Form von Teilbilanzen der Nachhaltigkeit, sodass auch ein objektiver und nachvollziehbarer Vergleich der Varianten möglich ist. Für die jeweiligen Teilbereiche des Untersuchungsrahmens werden repräsentative Indikatoren definiert und folglich berechnet, die als Grundlage für den Vergleich der Varianten herangezogen werden können. In den nachfolgenden Kapiteln sind diese Indikatoren im Detail dargestellt.

6.2.1 Kennzahlen der ökonomischen Bilanzierung

Stehen die Kosten für die Errichtung bzw. die Erneuerung und die bauliche Erhaltung zur Verfügung, können diese über die Betrachtungsperiode oder die gesamte technische Nutzungsdauer zusammengefasst werden. Die hierfür am häufigsten verwendete Methode ist die *Kapitalwertmethode*.

Der Kapitalwert ist eine Kennzahl der dynamischen Investitionsrechnung und ergibt sich aus der Summe, der auf die Gegenwart abgezinste zukünftigen Erfolge einer Investition. Durch die Abzinsung von zukünftigen Erfolgen auf die Gegenwart wird der Zeitwert des Geldes berücksichtigt. Die Kapitalwertmethode erlaubt somit die Beurteilung von Investitionen über eine bestimmte, abgegrenzte Betrachtungsperiode.

Für die Anwendung der Kapitalwertmethode im Rahmen der Lebenszykluskostenanalyse von Verkehrswegen ist es sinnvoll und zweckmässig, die allgemeine Funktion anzupassen und die notwendigen Investitionen als positiven Kapitalfluss zu definieren, sodass für die Berechnung des Nettokapitalwerts folgende Funktion herangezogen wird:

$$K_{M,0} = \sum_{t=0}^{t_E} KST_{M,t} \cdot q^{-t} \quad \text{mit } q = 1 + \frac{z_D - z_V}{100} \quad \text{Gl. 65}$$

mit

$K_{M,0}$ Nettokapitalwert aller Massnahmen M zum (Bezugs)Zeitpunkt $t = 0$ in [€] oder

[CHF]

$KST_{M,t}$ Kosten der Massnahme M zum Zeitpunkt t [€] oder [CHF]

q Zinsfaktor

z_D Diskontierungszinssatz in [%]

z_V Valorisierung / Inflationsrate in [%]

Da eine ökologische Bewertung von laufenden Instandhaltungsmassnahmen (z. B. Vergiessen von Rissen, kleinflächige Ausbesserungen) aufgrund von fehlenden Daten sowie starken Streuungen der Eingangswerte (Materialverbrauch, Transportwege, etc.) praktisch nicht möglich ist, werden aus Gründen der Vergleichbarkeit diese laufenden Kosten bei der ökonomischen Bilanzierung nur dann berücksichtigt, wenn sie als eigenständige Massnahme in der Ökobilanzierung aufscheinen (z. B. beim umfangreichen Austausch von einzelnen Betonplatten).

Der Nettokapitalwert ist in dieser Form wesentlich von der Betrachtungsdauer bzw. der technischen Nutzungsdauer abhängig. Dies bedeutet, dass bei Varianten bzw. Lösungen, die eine deutlich längere technische Nutzungsdauer und möglicherweise auch mehr Erhaltungsmassnahmen aufweisen, der Kapitalwert höher ist, obwohl die Lösung über die gesamte technische Nutzungsdauer ein besseres Ergebnis liefert. Aus diesem Grund muss der Nettokapitalwert in eine *Annuität* umgerechnet werden.

Mit der *Annuitätenmethode*, ebenfalls einem Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung, kann der Kapitalwert einer Investition auf die Nutzungsdauer so verteilt werden, dass die Zahlungsfolge aus Einzahlungen und Auszahlungen in die *Annuität* umgewandelt wird. In den Wirtschaftswissenschaften bzw. der Finanzmathematik bezeichnet man als Annuität (lateinisch *annus* für Jahr) eine regelmässig jährlich fliessende Zahlung, die sich aus den Elementen Zins und Tilgung zusammensetzt.⁵ Im Gegensatz zum Kapitalwert wird also nicht der Gesamtzielwert ermittelt, sondern der Zielwert pro Periode. Die Annuitätenmethode erlaubt somit die Beurteilung von Investitionen unterschiedlicher Anschaffungswerte und Nutzungsdauern. Der zusätzliche Nutzen der Annuitätenmethode liegt darin, dass dieses Verfahren die finanzwirtschaftlichen Konsequenzen von Investitionsentscheidungen periodenbezogen abbildet. Die Annuität ist das Produkt aus Kapitalwert und Annuitätenfaktor:

$$A_{K,M} = K_{M,0} \cdot ANF_N \quad \text{mit } ANF_N = \frac{q^N \cdot (q - 1)}{q^N - 1} \quad \text{und } q = 1 + \frac{z_D - z_V}{100} \quad \text{Gl. 66}$$

⁵ Wikipedia: [https://de.wikipedia.org/wiki/Annuit%C3%A4t_\(Investitionsrechnung\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Annuit%C3%A4t_(Investitionsrechnung)), abgefragt am 18.1.2022

mit

$A_{K,M}$ Annuität des Kapitalwertes K der Massnahmen M in [€] oder [CHF]

$K_{M,0}$ Nettokapitalwert aller Massnahmen M zum (Bezugs)Zeitpunkt $t = 0$ in [€] oder [CHF]

ANF_N Annuitätenfaktor für die (technische) Nutzungs- bzw. Betrachtungsperiode N

N (technische) Nutzungs- bzw. Betrachtungsperiode N in [Jahren]

q Zinsfaktor

z_D Diskontierungszinssatz in [%]

z_V Valorisierung / Inflationsrate in [%]

Sowohl der Nettokapitalwert als auch die Annuität können für jede zu untersuchende Variante berechnet werden und stellen somit die massgebenden Entscheidungsgrössen und -indikatoren für die ökonomische Beurteilung dar.

6.2.2 Kennzahlen der ökologischen Bilanzierung der Erhaltungsmassnahmen

Auch die Kennzahlen der ökologischen Bilanzierung ergeben sich durch Summierung über die gesamte technische Nutzungsdauer bzw. Betrachtungsperiode. Dabei sind einerseits die Auswirkungen durch die Massnahme selbst aus Material, Herstellung, Mischung, Transport, Einbau etc. zu berücksichtigen, andererseits deren Wirkungen auf den Verkehr. Damit ergibt sich folgende Bilanz für die Massnahmen M :

$$GWP_{M,N} = \sum_{t=0}^{t_E} GWP_{Bau,M,t} + \sum_{t=0}^{t_E} GWP_{VE,M,t} \quad \text{Gl. 67}$$

mit

$GWP_{M,N}$ GWP aller Massnahmen M (direktes GWP) für die (technische) Nutzungs- bzw. Betrachtungsperiode N in [kg-CO₂-äq]

$GW_{VE,M,t}$ GWP durch Verkehrsbeeinträchtigung der Massnahme M zum Zeitpunkt (Jahr) t in [kg-CO₂-äq]

$GW_{Bau,M,t}$ GWP durch Bau der Massnahme M zum Zeitpunkt (Jahr) t in [kg-CO₂-äq]

In analoger Weise ist dieser Gesamtwert für einen objektiven Vergleich auf eine Öko-Annuität umzurechnen:

$$A_{\text{öko},M} = \frac{GWP_{M,N}}{N} \quad \text{Gl. 68}$$

mit

$A_{\text{Öko},M}$ Öko-Annuität der Massnahmen M in [kg-CO₂-äq/Jahr]

$GWP_{M,N}$ GWP aller Massnahmen M (direktes GWP) für die (technische) Nutzungs- bzw. Betrachtungsperiode N in [kg-CO₂-äq]

N (technische) Nutzungs- bzw. Betrachtungsperiode N in [Jahren]

6.2.3 Kennzahlen der Verkehrssicherheit der Erhaltungsmassnahmen

Um die zusätzlichen Unfallkosten einer Variante zu berechnen, wird wieder auf die Kapitalwertmethode bzw. auf die Annuitätenmethode zurückgegriffen. Die entsprechenden auf die technische Nutzungsdauer bzw. Betrachtungsperiode bezogenen Kennzahlen werden wie folgt berechnet:

$$\Delta K_{U,0} = \sum_{t=0}^{t_E} \Delta KST_{U,t} \cdot q^{-t} \quad \text{mit } q = 1 + \frac{z_D - z_V}{100} \quad \text{Gl. 69}$$

$$A_{\Delta KU,M} = \Delta K_{U,0} \cdot ANF_N \quad \text{mit } ANF_N = \frac{q^N \cdot (q - 1)}{q^N - 1} \quad \text{und } q = 1 + \frac{z_D - z_V}{100} \quad \text{Gl. 70}$$

mit

$A_{\Delta KU,M}$ Annuität des Kapitalwertes K aller zusätzlichen Unfallkosten durch Massnahmen M in [€] oder [CHF]

$\Delta K_{U,0}$ Nettokapitalwert aller zusätzlichen Unfallkosten durch Massnahmen M zum (Bezugs)Zeitpunkt t = 0 in [€] oder [CHF]

$\Delta KST_{U,t}$ zusätzliche Unfallkosten während der Massnahme zum Zeitpunkt t in [€] oder [CHF]

N (technische) Nutzungs- bzw. Betrachtungsperiode N in [Jahren]

q Zinsfaktor

z_D Diskontierungszinssatz in [%]

z_V Valorisierung / Inflationsrate in [%]

6.2.4 Kennzahlen der sozio-ökologischen Bilanzierung der Langzeitwirkungen von Erhaltungsmassnahmen

Die sich aus den Massnahmen ergebenden, im Regelfall positiven Wirkungen auf den Strassenzustand können ebenfalls über die technische Nutzungsdauer bzw. Betrachtungsperiode kumuliert werden. Die Berechnung der Einsparungen, ausgedrückt über das GWP kann dem Kapitel 6.1.6.4 entnommen werden. Für einen objektiven Vergleich muss dieser Wert auf eine

Öko-Annuität (negativ, da Einsparung) wie folgt umgerechnet werden:

$$A_{\text{Öko,ZU}} = \frac{\text{GWP}_{\text{ZU,N}}}{N} \quad \text{Gl. 71}$$

mit

$A_{\text{Öko,ZU}}$ Öko-Annuität der Einsparungen durch einen verbesserten Zustand in [kg-CO₂-
äq/Jahr]

$\text{GW}_{\text{ZU,N}}$ Einsparung GWP durch einen verbesserten Strassenzustand (über den gesam-
ten Lebenszyklus) in [kg-CO₂-äq]

N (technische) Nutzungs- bzw. Betrachtungsperiode N in [Jahren]

6.2.5 Gesamtbilanz und Vergleichsmöglichkeiten

Aus den Ergebnissen bzw. Kennzahlen der Teilbilanzen ist es möglich, eine Gesamtbilanz zu erstellen. Dazu muss jede Kennzahl auf die gleiche Einheit umgerechnet werden, was über einen monetären Ansatz möglich ist. Aus den Teilbilanzen ergeben sich somit folgende Kennwerte für einen objektiven Vergleich:

- Ökonomische Teilbilanz der Massnahmenkosten: Annuität des Kapitalwertes K der Massnahmen M ($A_{K,M}$) in [€] oder [CHF] (siehe Gl. 68)
- Ökologische Teilbilanz der Massnahmen: monetäre Öko-Annuität der Massnahmen M in ($A_{\text{monÖko,M}}$) in [€] oder [CHF]:

$$A_{\text{monÖko,M}} = K_{\text{SGWP}} \cdot A_{\text{Öko,M}} \quad \text{Gl. 72}$$

mit

$A_{\text{monÖko,M}}$ monetäre Öko-Annuität der Massnahmen M in [€] oder [CHF]

$A_{\text{Öko,M}}$ Öko-Annuität der Massnahmen M in [kg-CO₂-äq/Jahr]

K_{SGWP} GWP-Kostensatz in [€/kg- CO₂-äq] oder [CHF/kg- CO₂-äq]

- Ökologische Teilbilanz der Einsparungen durch einen verbesserten Zustand: monetäre Öko-Annuität der Massnahmen M in ($A_{\text{monÖko,M}}$) in [€] oder [CHF]:

$$A_{\text{monÖko,ZU}} = K_{\text{SGWP}} \cdot A_{\text{Öko,ZU}} \quad \text{Gl. 73}$$

mit

$A_{\text{monÖko,ZU}}$ monetäre Öko-Annuität der Einsparungen durch einen verbesserten Zustand in [€] oder [CHF]

$A_{\text{Öko,ZU}}$ Öko-Annuität der Einsparungen durch einen verbesserten Zustand in [kg-
CO₂-äq/Jahr]

KS_{GWP} GWP-Kostensatz in [€/kg- CO₂-äq] oder [CHF/kg- CO₂-äq]

- Sozio-ökonomische Teilbilanz der zusätzlichen Unfallfolgekosten: Annuität des Kapitalwertes K aller zusätzlichen Unfallkosten durch Massnahmen M ($A_{\Delta\text{KU,M}}$) in [€] oder [CHF] (siehe Gl. 70).

Eine Summierung aller Kennwerte der Teilbilanzen ist grundsätzlich möglich, bedeutet aber, dass verschiedene, bedingt vergleichbare Kennwerte zusammengeführt werden. Dazu ist nachfolgend eine entsprechende Funktion angegeben (Gl. 74). Für die vergleichende Darstellung von Ergebnissen sollten jedoch ausschliesslich die einzelnen monetären Werte aller Teilbilanzen herangezogen werden.

$$A_{\text{ÖS}} = A_{\text{K,M}} + A_{\text{monÖko,M}} + A_{\text{monÖko,ZU}} + A_{\Delta\text{KU,M}} \quad \text{Gl. 74}$$

mit

$A_{\text{ÖS}}$ gesamte ökonomische, ökologische und soziale Annuität (= Nachhaltigkeitsannuität) in [€] oder [CHF]

$A_{\text{K,M}}$ Annuität des Kapitalwertes K der Massnahmen M in [€] oder [CHF]

$A_{\text{monÖko,M}}$ monetäre Öko-Annuität der Massnahmen M in [€] oder [CHF]

$A_{\text{monÖko,ZU}}$ monetäre Öko-Annuität der Einsparungen durch einen verbesserten Zustand in [€] oder [CHF]

$A_{\Delta\text{KU,M}}$ Annuität des Kapitalwertes K aller zusätzlichen Unfallkosten durch Massnahmen M in [€] oder [CHF]

7 SABINA-BILANZRECHNER

7.1 Grundlagen des SABINA-Bilanzrechners

Die Grundlagen des SABINA-Bilanzrechners in Form der Berechnungen zur Ökobilanzierung, der Algorithmen zur Berechnung der Bewertungsindikatoren sowie der funktionalen Anforderungen wurden in den vorangehenden Kapiteln umfassend beschrieben.

Neben diesen Grundlagen spielen auch die Inventardaten für die Ökobilanzierung eine wesentliche Rolle. Dabei wird auf bestehende Datenbanksysteme bzw. die entsprechenden Daten zurückgegriffen. Details hierfür können dem Kapitel 7.4 entnommen werden.

7.2 Technischer Anwendungsbereich

Der SABINA-Bilanzrechner wurde als methodisches Instrument zur systematischen Untersuchung und vergleichenden Bewertung von Varianten des Strassenoberbaus konzipiert. Ziel ist die Unterstützung fundierter Entscheidungsprozesse auf Grundlage ökologisch, technisch und gesellschaftlich relevanter Kennwerte. Voraussetzung für die Nutzung des SABINA-Bilanzrechners ist die Eingabe detaillierter projektspezifischer Daten, die einen hinreichend fortgeschrittenen Planungsstand erfordern. Dazu zählen insbesondere Angaben zu den eingesetzten Materialien, deren Lebenszyklen sowie zu den geplanten Erhaltungsmassnahmen.

In der gegenwärtigen Ausbaustufe des SABINA-Bilanzrechners ist mindestens ein Projektbearbeitungsstand erforderlich, der bereits technisch ausgereifte Lösungsansätze umfasst. Dies schliesst unter anderem eine Dimensionierung des Oberbaus, die Auslegung von Verstärkungsmassnahmen oder – im Falle von Instandsetzungsmassnahmen an der Fahrbahndecke – belastbare Schätzungen der Schichtdicken ein. Darüber hinaus sind den relevanten Schichten eindeutige Baustoffe zuzuordnen. Der notwendige Informationsstand entspricht im Wesentlichen den Ansprüchen eines Einreichprojekts.

Das methodische Kernprinzip des SABINA-Bilanzrechners beruht auf einer vergleichenden Analyse. Dabei werden mindestens zwei Varianten gegenübergestellt:

- eine Basisvariante sowie
- eine Vergleichsvariante.

Die Festlegung der Eingangsparameter für die jeweiligen Varianten obliegt der Anwenderin. Entsprechend kann frei bestimmt werden, welche Lösung als Basisvariante und welche als Alternative definiert wird.

Da der SABINA-Bilanzrechner primär für den Einsatz in Vergleichsrechnungen vorgesehen ist, ist die Wahrung eines konsistenten Untersuchungsrahmens von grosser Bedeutung. Nur wenn beide Varianten auf denselben Bezugsgegenstand – den Strassenoberbau – unter vergleichbaren Annahmen angewendet werden, lassen sich die Ergebnisse objektiv und belastbar interpretieren.

Besonders hervorzuheben ist, dass der relative Vergleich zwischen Basis- und Vergleichsvariante das primäre Resultat der Analyse darstellt. Absolute Ergebniswerte hingegen sind stark von den jeweiligen Eingangsdaten abhängig. Ihre wissenschaftlich valide Nutzung setzt daher eine sorgfältige ingenieurmässige Bewertung voraus, bevor diese für weiterführende Untersuchungen oder Entscheidungen herangezogen werden.

7.3 Überblick Eingangsdaten

Um den SABINA-Bilanzrechner verwenden zu können, ist es stets erforderlich, die notwendigen Eingangsdaten entsprechend aufzubereiten. Welche Informationen im Detail hierfür notwendig sind, kann der folgenden Auflistung entnommen werden:

- Allgemeine Eingangsdaten
 - Allgemeine bauliche Informationen zum Strassenabschnitt (Länge, Breite, Anzahl Fahrstreifen etc.)
 - Verkehrsbelastung (Verkehrsstärke) mit aktuellen Verkehrszahlen, Aufteilung auf die Fahrzeugkategorien (PKW, LKW und E-PKW) sowie entsprechende Zuwachsraten
- Detaillierte Daten des Verkehrs und des Fahrzeugkollektivs (Verkehrsdaten)
 - Massgebende Tagesganglinie (als Vorlage verfügbar)
 - Informationen zum Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch je Fahrzeugkategorie (als Vorlage verfügbar)
 - Funktionaler Zusammenhang Verbrauch und Ebenheit (als Vorlage verfügbar)
 - Generelle Baustelleninformationen (Staugeschwindigkeit und Dauer der Baustelle)
 - Wirtschaftlichkeitsparameter
- Massnahmen innerhalb des Lebenszyklus (jeweils für Basisvariante und Vergleichsvariante)
 - Allgemeines

- Informationen zur technischen Nutzungsdauer (Art, Jahr, Dauer bis zur nächsten Massnahme)
- Kosten der Erhaltungsmassnahme
- Spezifische Baustelleninformationen (Kapazität während Massnahme, Anzahl Fahrstreifen etc.)
- Zustandsinformationen (Längsebenheit) vor und nach Massnahme
 - Daten zur Entsorgung von Bestandschichten
 - Daten zur Herstellung der Materialien für neue Schichten
 - Daten zur Errichtung von neuen Schichten

Diese Daten können von der Anwenderin über das graphische User-interface (GUI) in den SABINA-Bilanzrechner eingegeben und für das erstellte bzw. ausgewählte Projekt abgespeichert werden. Details hierzu können dem Benutzungshandbuch (siehe Anhang) entnommen werden.

7.4 Öko-Datenbanken

Öko-Datenbanken enthalten die relevanten Umweltkennzahlen (z. B. GWP) für verschiedene Materialien sowie für Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse. Auf dieser Grundlage können ökologische Auswirkungen systematisch erfasst, verglichen und bewertet werden.

Im Rahmen des Projekts SABINA werden insbesondere folgende Datenbanken (siehe 5.3.1) herangezogen, da sie eine hohe Datenqualität, Transparenz und internationale Vergleichbarkeit gewährleisten:

- **Ecoinvent** für Deutschland und Österreich
- **UVEK-Datenbank** für die Schweiz

Die aus den beiden Datenbanken übertragenen Daten können dem elektronischen Anhang des Implementierungsleitfadens (siehe Anhang) entnommen werden.

Die Nutzung dieser Daten im Rahmen des Projekts SABINA ist zulässig. Details für weiterführende Nutzungen der Öko-Daten können für die Ecoinvent-Datenbank der Website www.ecoinvent.org entnommen werden.

Die hier verwendeten Daten entsprechen den Anforderungen für die Durchführung einer qualitätsgesicherten Ökobilanzierung von Baumaterialien, Mischungen und Herstellungen. Grundsätzlich können Daten aus anderen Quellen herangezogen werden, jedoch ist dabei auf eine

zumindest gleichwertige Qualitätssicherung und eine entsprechende Vergleichbarkeit des Bewertungsrahmens (z. B. welche Teilprozesse sind im jeweiligen Wert abgebildet) zu achten, was eine wesentliche Voraussetzung darstellt. Weitere Details hierzu finden sich im Implementierungsleitfaden (Anhang).

7.5 Webbasierte Lösung

Um einen möglichst einfachen und effizienten Zugriff zum SABINA-Bilanzrechner zu ermöglichen, wurden die entwickelten Algorithmen und Berechnungscodes als webbasierte Lösung umgesetzt. Dies bedeutet, dass Anwenderinnen ohne Installation von zusätzlichen Programmen direkt über einen Webbrowser den SABINA-Bilanzrechner verwenden können, sofern die entsprechenden Zugriffsrechte (User-name und Passwort) zur Verfügung stehen. Als Webbrowser können Microsoft Edge, Google Chrome oder Firefox verwendet werden.

Der SABINA-Bilanzrechner ist unter folgender Internet-Adresse aufrufbar (Abbildung 15):

<https://sabina-tool.net/>

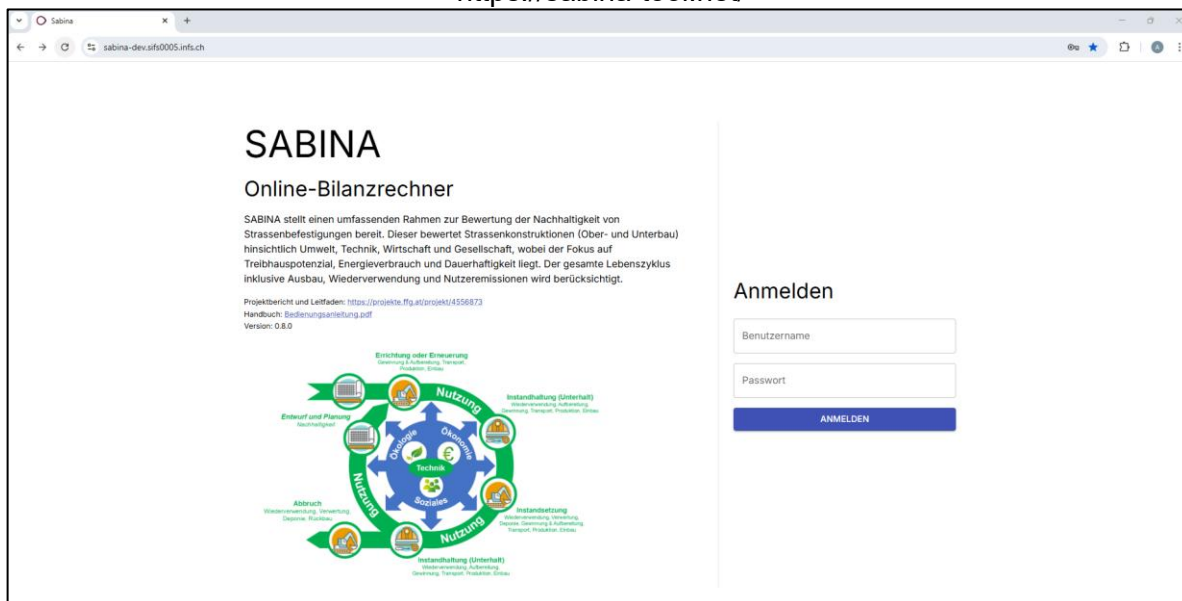
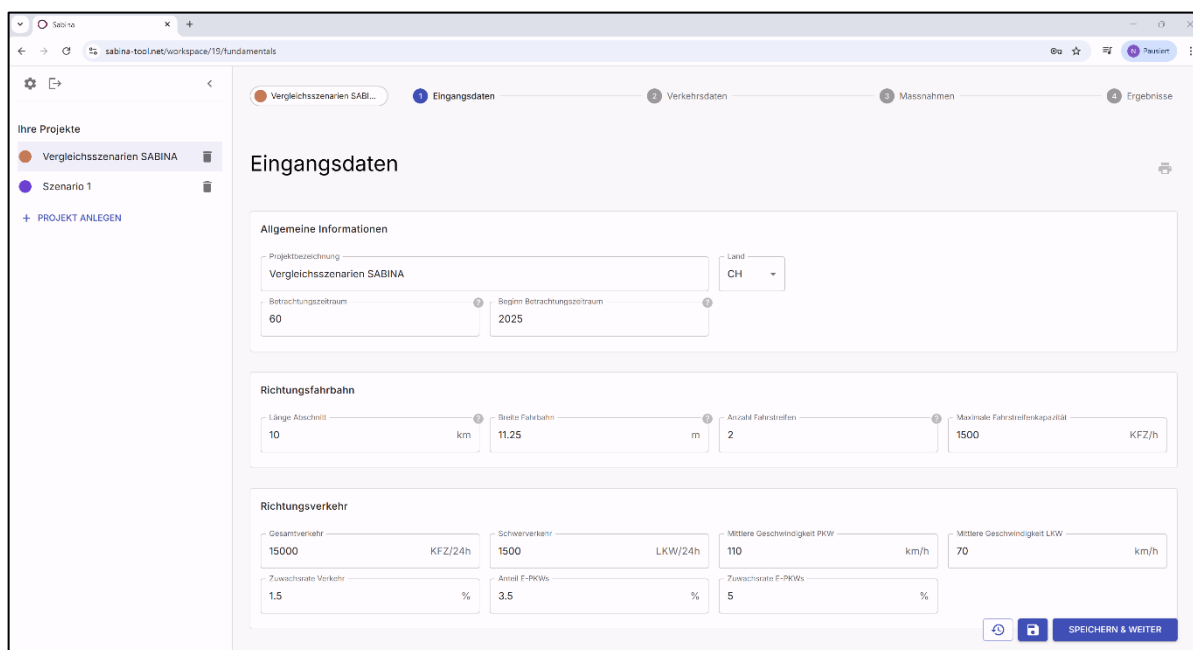


Abbildung 15: Login-Seite des SABINA-Bilanzrechners

User-name und Passwort werden nach Registrierung bei der Umtec Technologie AG und nach Erlaubnis durch die Auftraggeberin und die Auftragnehmerin individuell vergeben. Für das Anlegen von Anwenderinnen steht im Administrator-Bereich des SABINA-Bilanzrechners eine entsprechende Funktion zur Verfügung. Für den Zeitraum der Bereitstellung des SABINA-Bilanzrechners über die Website der Auftragnehmerin bleiben die Zugriffsrechte für diesen Administrator-Bereich und somit jene von Anwenderinnen ausschliesslich bei der Auftragnehmerin.

Nach dem Login stehen der Anwenderin die notwendigen Funktionen zur Beurteilung von Strassenoberbauten im Rahmen eines Projekts zur Verfügung (Abbildung 16). Eine detaillierte Beschreibung der umfassenden Funktionen kann dem Benutzungshandbuch entnommen werden (Anhang).



The screenshot shows the 'Eingangsdaten' (Input Data) section of the SABINA web-based balance calculator. The interface includes a sidebar with project management options and a main content area with several input fields organized into sections.

Allgemeine Informationen

- Projektbezeichnung: Vergleichsszenarien SABINA
- Land: CH
- Betrachtungszeitraum: 60
- Beginn Betrachtungszeitraum: 2025

Richtungsfahrbahn

- Länge Abschnitt: 10 km
- Breite Fahrbahn: 11.25 m
- Anzahl Fahrstreifen: 2
- Maximale Fahrstreifenkapazität: 1500 KFZ/h

Richtungsverkehr

Gesamtverkehr		Schwerenverkehr		Mittlere Geschwindigkeit PKW		Mittlere Geschwindigkeit LKW	
15000	KFZ/24h	1500	LKW/24h	110	km/h	70	km/h
1.5	%	3.5	%	5	%		

Buttons at the bottom:   **SPEICHERN & WEITER**

Abbildung 16: Webbasierter SABINA-Bilanzrechner (Eingangsdaten)

7.6 Implementierung

Zur Implementierung des SABINA-Bilanzrechners wurde ein detaillierter Implementierungsleitfaden erstellt, welcher dem Anhang entnommen werden kann. Er dient als praxisorientierte Unterstützung für die Nutzung des SABINA-Bilanzrechners zur Beurteilung und zum Vergleich von Strassenoberbauvarianten hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeitsaspekte über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg. Er unterstützt die rasche Implementierung des SABINA-Bilanzrechners in bestehende Entscheidungs- und Verwaltungsprozesse der Strassenverwaltungen, um technische Lösungen, organisatorische Strukturen und prozessuale Abläufe harmonisch aufeinander abzustimmen. Für die Implementierung sind dabei folgende Informationen von wesentlicher Bedeutung:

- Der SABINA-Bilanzrechner unterstützt die Analyse und den Vergleich von mindestens zwei Varianten, einer Basis- und einer Alternativlösung, und berücksichtigt dabei den gesamten Lebenszyklus einer Strassenkonstruktion gemäss Europäischer Norm

EN 15643-5 [12] von der Materialherstellung (Module A1 bis A3) über Bau und Nutzung (Module A4 bis B4) bis hin zur Entsorgung (Module C1 bis C4).

- Der SABINA-Bilanzrechner kann sofort Anwendung in der strategischen und operativen Erhaltungsplanung, in der Projektbearbeitung und bei Ausschreibungen finden.
- Der geografische Geltungsbereich des SABINA-Bilanzrechners umfasst Deutschland, Österreich und die Schweiz, wobei länderspezifische Materialdaten und Oberbauweisen automatisch berücksichtigt werden. Er ist in deutscher Sprache konzipiert.
- Die Hauptzielgruppen sind Ingenieurinnen in nationalen Strassenverwaltungen, Fachplanerinnen im Pavement Management sowie Expertinnen für Ausschreibung und Vergabe.

Für die Nutzung des SABINA-Bilanzrechners sind detaillierte Eingangsdaten erforderlich, darunter technische Projektinformationen, Verkehrsdaten, Angaben zu Materialeigenschaften, Bauprozessen und Energieverbrauch. Die zugrunde liegenden Öko-Daten stammen aus qualitätsgesicherten Quellen, der *Ecoinvent-Datenbank* (für Deutschland und Österreich) sowie der *UVEK-Datenbank* (für die Schweiz). Diese werden regelmässig aktualisiert, um die Vergleichbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten.

Für die praktische Implementierung stehen zwei Varianten der Nutzung zur Verfügung:

1. Die webbasierte Anwendung des SABINA-Bilanzrechners auf der Plattform der Auftragnehmer (für einen Zeitraum von zwei Jahren einschliesslich Wartung und Datenpflege).
2. Die Integration des SABINA-Bilanzrechners in die IT-Umgebung der Strassenverwaltungen, wobei die Verantwortung für Wartung, Datensicherung und Anpassungen dann bei den jeweiligen Verwaltungen liegt. Für diese Implementierung werden technische und organisatorische Anforderungen im Leitfaden definiert, etwa im Hinblick auf Serverinfrastruktur, IT-Sicherheit, Schnittstellenkompatibilität und Datenschutz.

Ein weiterer Schwerpunkt des Leitfadens liegt auf Schulungen, um die Anwenderinnen mit den theoretischen Grundlagen, Algorithmen und Bedienfunktionen des Systems vertraut zu machen. Nach erfolgreicher Implementierung gibt das Dokument Hinweise zur kontinuierlichen Pflege und Weiterentwicklung des Systems, einschliesslich regelmässiger Datenaktualisierung, Evaluierung der Ergebnisse und laufender Verbesserung der Modelle.

8 DEMONSTRATION DER POTENZIALE DES SABINA-BILANZRECHNERS (BERECHNUNGSBEISPIELE)

8.1 Wahl der Berechnungsvarianten

Zur Validierung des Rechenmodells und zur Abschätzung von möglichen Einsparungs- und Optimierungspotenzialen wurden verschiedene Beispiele mit unterschiedlichen Berechnungsvarianten unter Heranziehung des SABINA-Bilanzrechners berechnet. Dabei handelt es sich stets um einen relativen Vergleich zwischen zwei Varianten.

Einerseits wird dabei die korrekte Berücksichtigung von unterschiedlichen Eingabeparametern überprüft, andererseits dienen die Vergleichsergebnisse als Grundlage zur Beurteilung möglicher Optimierungspotenziale. Zur methodischen Abbildung des geografischen Geltungsbereichs des SABINA-Bilanzrechners wurden die Beispielrechnungen systematisch unter Anwendung unterschiedlicher länderspezifischer Vorgaben und Auswahlparameter durchgeführt. Dabei wurden jeweils die einschlägigen nationalen Regelungen herangezogen. Die dargestellten Beispielrechnungen sind grundsätzlich für alle länderspezifischen Vorgaben anwendbar und können den jeweiligen nationalen Regelungen entsprechend durchgeführt werden. Darüber hinaus wurden die Beispiele auch zur Beurteilung und Veranschaulichung der definierten Systemgrenzen herangezogen. Dadurch ist der Bezug zur tatsächlichen Praxis teilweise eingeschränkt, da die gewählten Annahmen und Abgrenzungen primär methodischen Zwecken dienen. Eine unmittelbare bzw. 1:1-Übertragung der Ergebnisse auf reale Projekte ist daher wenig sinnvoll. Die nachfolgenden Beispiele und Ergebnisse liefern somit einen ersten Überblick über die wesentlichen Erkenntnisse aus den Berechnungen des SABINA-Bilanzrechners und somit die notwendige Grundlage für den *Best Practice Katalog*.

Sämtliche Berechnungsvarianten basieren auf Standardoberbauten, sodass ein mögliches Optimierungspotenzial untersucht und analysiert werden kann. Die Grundlage für die Berechnungsvarianten sind folgende Fragestellungen für den SABINA-Bilanzrechner:

- Vergleich von unterschiedlichen Asphaltarten mit unterschiedlicher Zusammensetzung und Dicke für die gleiche Asphaltbauweise mit gleicher technischer Nutzungsdauer.
- Vergleich von unterschiedlichen Bauweisen (Asphalt und Beton) mit gleichen technischen Nutzungsdauern. Sowohl für die Asphaltbauweise als auch die Betonbauweise wurde eine technische Nutzungsdauer von 44 Jahren festgelegt. Um die Auswirkungen

von Staus infolge von Baumassnahmen abschätzen zu können, wurde eine hohe Verkehrsbelastung angenommen, die im Verlauf des Lebenszyklus nahezu die Kapazitätsgrenze erreicht.

- Vergleich von unterschiedlichen Bauweisen (Asphalt und Beton) mit deutlich unterschiedlichen technischen Nutzungsdauern. Bei der Asphaltbauweise wird ein zusätzlicher Erneuerungszyklus berücksichtigt, sodass bei dieser Lösung die technische Nutzungsdauer 80 Jahre beträgt, im Vergleich zur technischen Nutzungsdauer der Betondecke von 44 Jahren. Dieses Szenario dient dazu, die Anwendungsgrenzen aufzuzeigen.

Als Ausgangssituation ist für alle Berechnungsvarianten eine 10 km lange, zweistreifige Richtungsfahrbahn auf freier Strecke eines bestehenden Autobahnabschnittes definiert, dessen Strassenoberbau erneuert werden muss. Die Richtungsfahrbahn ist durch einen Mittelstreifen baulich von der Gegenfahrbahn getrennt und weist einen Standstreifen (befestigter Seitenstreifen bzw. Abstellstreifen) auf. Die herangezogenen Regelquerschnitte werden anschließend in Abhängigkeit vom gewählten Beispielland detailliert erläutert und entsprechen den gewählten nationalen Vorgaben. Dies gilt ebenfalls für die jeweiligen Oberbauvarianten.

8.2 Allgemeine Eingangsdaten für alle Berechnungsvarianten

Die zunächst beschriebenen Eingangsdaten für die Abschätzung von Einsparungs- und Optimierungspotenzialen gelten für alle nachfolgenden Berechnungsvarianten und sind das Ergebnis der zuvor durchgeführten Untersuchungen und Analysen im Rahmen der Modellierung. Es handelt sich dabei auch um Werte, die zur Charakterisierung der Verkehrsbelastung und der -kapazitäten notwendig sind, die Eigenschaften der Fahrzeugkategorien beschreiben, einen einheitlichen Ausgangszustand der Bestandsstrecken definieren und auch Vorgaben für die Geschwindigkeiten in den unterschiedlichen Nutzungsphasen beinhalten.

Grundsätzlich ist es im SABINA-Bilanzrechner möglich, diese Eingangsdaten für jede Berechnungsvariante zu variieren bzw. anzupassen und für jedes zu analysierende Projekt individuell festzulegen. Die gewählten Werte stellen gleichzeitig Empfehlungen dar, die gewählt werden können, wenn keine detaillierteren Informationen zur Verfügung stehen, sodass sie als Vorlage für zukünftige Analysen dienen können.

Die Gesamtverkehrsbelastung sowie der Schwerverkehr wurden je nach Fragstellung für die jeweilige Berechnungsvariante unterschiedlich gewählt. Identische Eingangsgrößen sind im

Bereich des Verkehrs die maximale Fahrstreifenkapazität mit 1'500 Kfz/h und die Tagesverteilung des Verkehrs. Die Verteilung des Verkehrs über den Tag wird anhand der relativen Tagesganglinie (siehe Tabelle 19 und Abbildung 17) festgelegt, die in Anlehnung an die Vorschläge nach [80] gewählt wurde.

Tabelle 19: Prozentuale Werte der relativen Tagesganglinie

Stunde	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tagesverkehr [%]	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	5	8	9	7	6	5

Stunde	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Tagesverkehr [%]	5	5	6	6	6	7	6	5	4	3	2	1

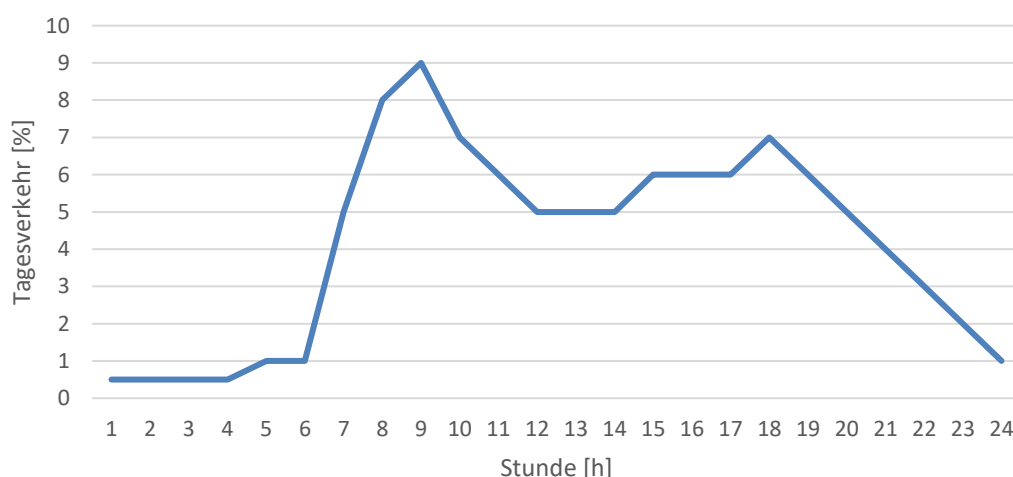


Abbildung 17: Relative Tagesganglinie als Basis der Berechnungsvarianten

Um das Verkehrsaufkommen über den Betrachtungszeitraum abzubilden, wird eine Zuwachsrate des Verkehrs definiert, die sich nach den Vorschlägen in den Oberbaubemessungsrichtlinien der jeweiligen Länder orientiert und somit individuell für jedes Beispiel angegeben werden muss. Zur realen Abbildung der Verteilung der Verkehrsflotte wird ein Anteil an E-PKW festgelegt, der auch mit einer Zuwachsrate versehen wird (die Zuwachsraten sind in den D-A-CH-Ländern nicht einheitlich). Der Anteil der E-PKW beträgt zu Beginn des Betrachtungszeitraums 3.5 %, was nach dem Bundesverband der Elektromobilität Österreich (BEO) dem Stand

Sommer 2024 in Österreich entspricht⁶. Dieser Prozentsatz wird jährlich um 5 % erhöht, um die Veränderung des E-PKW-Anteils zu modellieren.

Als weitere Eingangsgrösse muss die mittlere Geschwindigkeit der PKW und LKW im betrachteten Streckenabschnitt angegeben werden. Für die Berechnungsvarianten wird von einer mittleren PKW-Geschwindigkeit von 110 km/h sowie einer mittleren LKW-Geschwindigkeit von 70 km/h ausgegangen. Beide Geschwindigkeiten liegen unter den höchstzulässigen Geschwindigkeiten dieser beiden Fahrzeugkategorien für freie Strecken in allen D-A-CH-Ländern. Für die jeweiligen Fahrzeugkategorien muss in weiterer Folge auch der Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch entsprechend der definierten Geschwindigkeitsbereiche festgelegt werden (vgl. Kapitel 6.1.4 Treibstoff- und Energieverbrauch). Tabelle 20 zeigt die Eingangswerte für die durchgeführten Berechnungen auf der Grundlage der in Kapitel 6.1.4 durchgeführten Untersuchungen.

Tabelle 20: Kraftstoff- und Energieverbrauch

Kraftstoffverbrauch	0-20 km/h	20-40 km/h	40-60 km/h	60-80 km/h	80-100 km/h	100-120 km/h	>120 km/h
PKW [Liter/100km]	15	9	7	6	6	8	10.5
LKW [Liter/100km]	55	40	31.5	25	32.5	-	-
E-PKW [kWh/100km]	20	16	14	12	14	17.5	21.5

Im nächsten Schritt müssen die Zusammenhänge zwischen Strassenzustand und Treibstoff- bzw. Energieverbrauch angegeben werden. Die Werte der Berechnungsvarianten orientieren sich an den Empfehlungen für die Modellparameter k und d gemäss Tabelle 16 und den dort referenzierten Grundlagen (z. B. [92]).

Die Längsebenheit der Strasse wird normgemäss in Österreich über den IRI, in Deutschland über den AUN und in der Schweiz über den s_w -Wert beschrieben. Die Berechnungsvarianten wurden anhand des Zustandsmerkmals IRI eingegeben. Wenn die Eingabe als AUN- oder s_w -Wert erfolgt, wird der eingegebene Wert automatisch in das IRI-Format umgerechnet. Die Ausgangswerte vor der ersten Massnahme wurden dabei für alle Szenarien identisch angenommen. Die IRI-Werte sowie der Zeitpunkt der nachfolgenden Massnahmen variieren bei

⁶ Bundesverband der Elektromobilität Österreich (BEO): <https://www.beoe.at/be-stand/#:~:text=Mit%20Ende%20September%202024%20gibt,gesamten%20Pkw%2DBestands%20in%20%C3%96sterreich.&text=Mit%20Ende%20August%202024%20gibt,gesamten%20Pkw%2DBestands%20in%20%C3%96sterreich>. Letzte Abfrage 12/2024

den nachfolgenden Berechnungen der jeweiligen Varianten und sind somit bei jeder Berechnungsvariante separat dokumentiert.

Tabelle 21: Funktionaler Zusammenhang Verbrauch und Ebenheit (IRI)

	k-Wert	d-Wert
PKW 0-20 km/h	0.02	0.98
PKW > 20 km/h	0.03	0.97
LKW 0-20 km/h	0.03	0.97
LKW 20-60 km/h	0.05	0.95
LKW 60-80 km/h	0.04	0.96

Tabelle 22 zeigt die gewählten Eingangsdaten für den Ebenheitsparameter IRI unter der Annahme, dass nach dem Durchführen der Massnahme auch eine deutliche Verbesserung der Ebenheit erreicht wird und somit auch die langfristigen Wirkungen quantifiziert werden können. Die angesetzten Verbesserungen (Wirkungen) sowie die Änderungsraten wurden in Anlehnung an Vorgaben aus Pavement-Management-Anwendungen in Deutschland und Österreich gewählt. So empfiehlt beispielsweise das österreichische PMS-Handbuch [44] für die Längsebenheit die Anwendung eines nahezu linearen Zustandsprognosemodells mit einem Startwert zwischen 0,5 und 1,0 m/km sowie einer jährlichen Änderungsrate im Bereich von 0,08 bis 0,13 m/km. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der modellhaften Annahmen Abweichungen zur tatsächlichen Entwicklung in der Realität möglich und wahrscheinlich sind.

Tabelle 22: IRI-Werte der vor und nach der ersten Massnahme aller Berechnungsvarianten

	IRI [m/km]
Längsebenheit vor der Massnahme	2.4
Änderungsrate Längsebenheit vor der Massnahme	0.08
Längsebenheit nach der Massnahme	0.8
Änderungsrate Längsebenheit nach der Massnahme	0.12

Abbildung 18 zeigt schematisch die Entwicklung des IRI-Wertes und die in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der ersten Nachfolgemassnahme zu erwartende Längsebenheit für den Verlauf ohne Massnahme und den Verlauf mit erster Massnahme als Grundlage für die Abschätzung der Langzeitwirkungen.

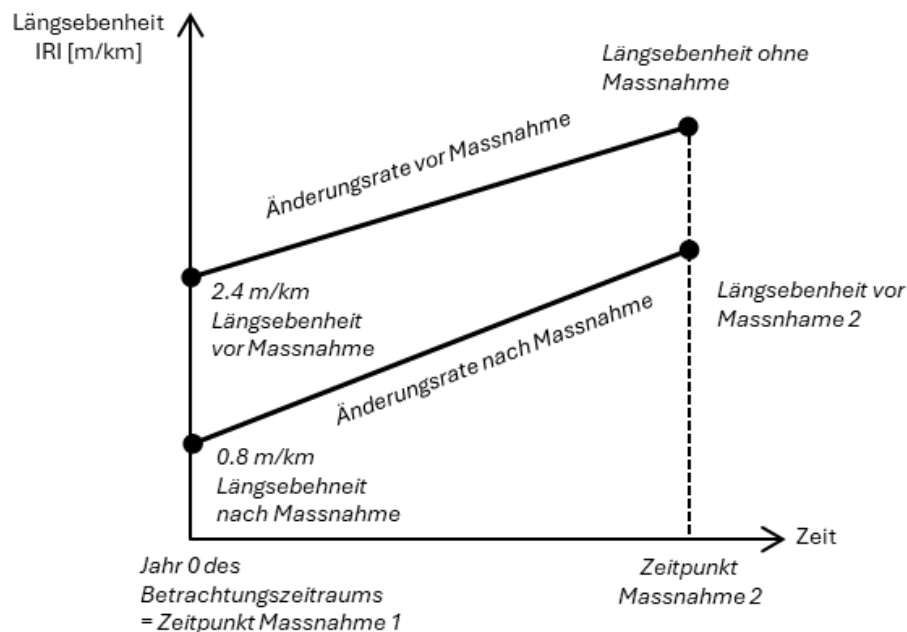


Abbildung 18: Zusammenhang der IRI-Funktionen vor und nach Massnahme

Weiters müssen baustellenbezogene Verkehrsdaten definiert werden, die durch die Einschränkungen des Baus entstehen. Als realistische Annahme reduziert sich die mittlere PKW-Geschwindigkeit im Baustellenbereich auf 70 km/h, während die mittlere LKW-Geschwindigkeit auf 60 km/h sinkt.

Während der Baustelle gilt eine 4+0 Verkehrsführung und es stehen weiterhin zwei Fahrstreifen in jede Hauptrichtung zur Verfügung bei einer angenommenen maximalen Fahrstreifenkapazität von 1'100 KFZ/h. Zusätzlich werden 2 % Ausweichverkehr berücksichtigt. Die Einschränkung der Gegenrichtungsfahrbahn beträgt somit 100 % (siehe hierzu Tabelle 17). Diese Parameter sind für jede weiterfolgende Massnahme erneut zu definieren. Falls in den Berechnungsbeispielen Abweichungen auftreten, wird dies bei der Beschreibung dokumentiert.

8.3 Variation Asphaltarten

8.3.1 Eingangsdaten Oberbauvarianten

Für das Beispiel der Variation der Asphaltarten wurden die nationalen Vorgaben aus der Schweiz herangezogen. Das Normalprofil des untersuchten Autobahnabschnitts entspricht somit dem Normalprofil einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn gemäss der Richtlinie Normalprofile Nationalstrassen 1. Klasse und 2. Klasse des Bundesamtes für Strassen ASTRA [93]. Als Basisszenario wird eine freie Strecke mit zwei Fahrstreifen und einem Pannestreifen je

Fahrtrichtung definiert. Die Standardbreite für zweistreifige Fahrbahnen beträgt 3.75 m je Fahrstreifen. Die Standardbreite für Pannestreifen auf freier Strecke beträgt 3.25 m und die Randlinien sind jeweils 0.25 m breit [93]. Die Breite der gesamten Fahrbahn je Fahrtrichtung beträgt folglich 11.25 m (2 x 3.75 m + 3.25 m + 2 x 0.25 m). Somit beträgt die gesamte Fahrbahnbreite in beide Fahrtrichtungen 22.5 m. Die beiden Richtungsfahrbahnen sind durch einen 3.00 m breiten Mittelstreifen voneinander getrennt und die Breite des Banketts beträgt jeweils 1.50 m. Damit beträgt die Breite der bilanzierten Richtungsfahrbahn 11.25 m und die Breite der Strassenkrone 14.25 m. Die gewählte Gesamtverkehrsbelastung beträgt 15'000 KFZ/24h mit einer Schwerverkehrsbelastung von 10 %.

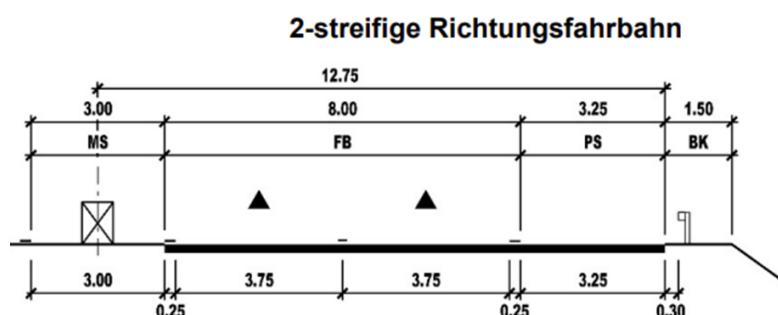


Abbildung 19: Normalprofil einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn, Bsp. Schweiz [93]

Im Vorfeld wurde auch hier eine Oberbaudimensionierung gemäss VSS 40320 [26] (Gl. 75) für eine Bemessungsperiode von $n = 20$ Jahren durchgeführt, um die Belastungsklassen der Berechnungsvarianten CH-1 und CH-2 zu ermitteln. Der Bemessung liegt eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs im Nutzungsjahr von $DTV(SV) = 1'300$ LKW/24h je Richtung zugrunde. Der Parameter f (Aufteilung des Schwerverkehrs auf die Fahrstreifen) wurde mit 0.9 angenommen, der Äquivalenzfaktor k mit 1.8 (Transitautobahn). Die mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs r (Zuwachsrate) wurde mit 0.03 angenommen (ergibt für das Zuwachsmo del im SABINA-Bilanzrechner eine Zuwachsrate von 1.5 %).

$$TF_n = \frac{(1 + r)^n - 1}{r \cdot n} \cdot TF_0 \quad TF_0 = DTV(SV) \cdot f \cdot k \quad \text{Gl. 75}$$

$$W_n = 365 \cdot n \cdot TF_n$$

mit

TF_0 Tägliche äquivalente Verkehrslast im Jahr der Erneuerungsmassnahme oder der Verstärkung

TF_n Tägliche äquivalente Verkehrslast

W_nGesamte äquivalente Verkehrslast

DTV(SV).....durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs [LKW/24h]
 nAnzahl Jahre der gesamten Gebrauchsdauer
 r Jährliche Zuwachsrate (geometrisch)
 f Aufteilungsfaktor der totalen Verkehrslast je nach Anzahl der Fahrstreifen
 k Durchschnittlicher Äquivalenzfaktor

Nach der Berechnung gemäss Gl. 75 beträgt die Summe der gewichteten äquivalenten 10-t-Verkehrslast für den Autobahnabschnitt 23.83 Millionen, weshalb für die Auswahl des Oberbaus die Verkehrslastklasse T6₂₀ massgebend ist (Abbildung 20).

Die Auswahl des Strassenoberbaus erfolgt in Anlehnung an das *Fachhandbuch Trasse / Umwelt des Bundesamtes für Strassen ASTRA* [94]. Der gewählte Strassenoberbau für die Berechnungsvarianten CH-1 und CH-2 entspricht dem Oberbautyp 2 der Verkehrslastklasse T6₂₀ und der Tragfähigkeitsklasse S3 (Abbildung 21).

Verkehrslastklassen für die Dimensionierung auf 20 Jahre <i>Classes de trafic pondéral pour le dimensionnement sur 20 ans</i>	
Verkehrslastklassen <i>Classes de trafic pondéral</i> T _{i20}	Tagliche äquivalente Verkehrslast <i>Trafic pondéral équivalent journalier</i> TT ₂₀
T1 ₂₀ Sehr leicht <i>Très léger</i>	≤ 30
T2 ₂₀ Leicht <i>Léger</i>	> 30... 100
T3 ₂₀ Mittel <i>Moyen</i>	> 100... 300
T4 ₂₀ Schwer <i>Lourd</i>	> 300... 1 000
T5 ₂₀ Sehr schwer <i>Très lourd</i>	> 1000... 3 000
T6 ₂₀ Extrem schwer <i>Extrêmement lourd</i>	> 3000...10 000

Tab. 3
Verkehrslastklassen für die Dimensionierung auf 20 Jahre

Tab. 3
Classes de trafic pondéral pour le dimensionnement sur 20 ans

Abbildung 20: Verkehrslastklassen für die Dimensionierung auf 20 Jahre gemäss VSS Norm 40324:2019, Bsp. Schweiz [27]

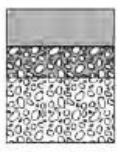
Oberbautyp 2		Asphaltschicht(en) auf Asphaltbeton für Fundamentalschichten AC F und ungebundenem Gemisch					
Type de chaussée 2		Couche(s) en enrobé bitumineux sur enrobés bitumineux pour couches de fondation AC F et grave non traitée					
		Tragfähigkeitsdimensionierung Dimensionnement de la portance			Frostdimensionierung Dimensionnement au gel		
					Frost-indices Indices de gel FI_s	Frostdimensionierungsfaktor f Facteur de dimensionnement f	
T_{120}	S2	S3	S4			G3	G4
T_{620}	 180 mm 140 mm 300 mm 620 mm	 180 mm 110 mm 200 mm 490 mm					
FI_s^*	300	200					
T_{520}	 150 mm 110 mm 300 mm 560 mm	 150 mm 90 mm 200 mm 440 mm			< 400 400...600 > 600	0,45 0,45 0,50	0,55 0,55 0,60
FI_s^*	250	200					
T_{420}	 120 mm 90 mm 300 mm 510 mm	 120 mm 70 mm 200 mm 390 mm		Typ 3 Type 3			
FI_s^*	250	200					

Abbildung 21: Oberbautyp 2 gemäss VSS Norm 40324:2019, Bsp. Schweiz [27]

8.3.1.1 Berechnungsvariante CH-1 (Asphaltbauweise)

Für den Schichtaufbau von Berechnungsvariante CH-1 wird ein typischer Schichtaufbau aus dem *Fachhandbuch Trasse / Umwelt des Bundesamtes für Strassen ASTRA* gewählt [94]. Dem entsprechend werden für den Bau von Nationalstrassen im Regelfall folgende Oberbaukonstruktionen verwendet.

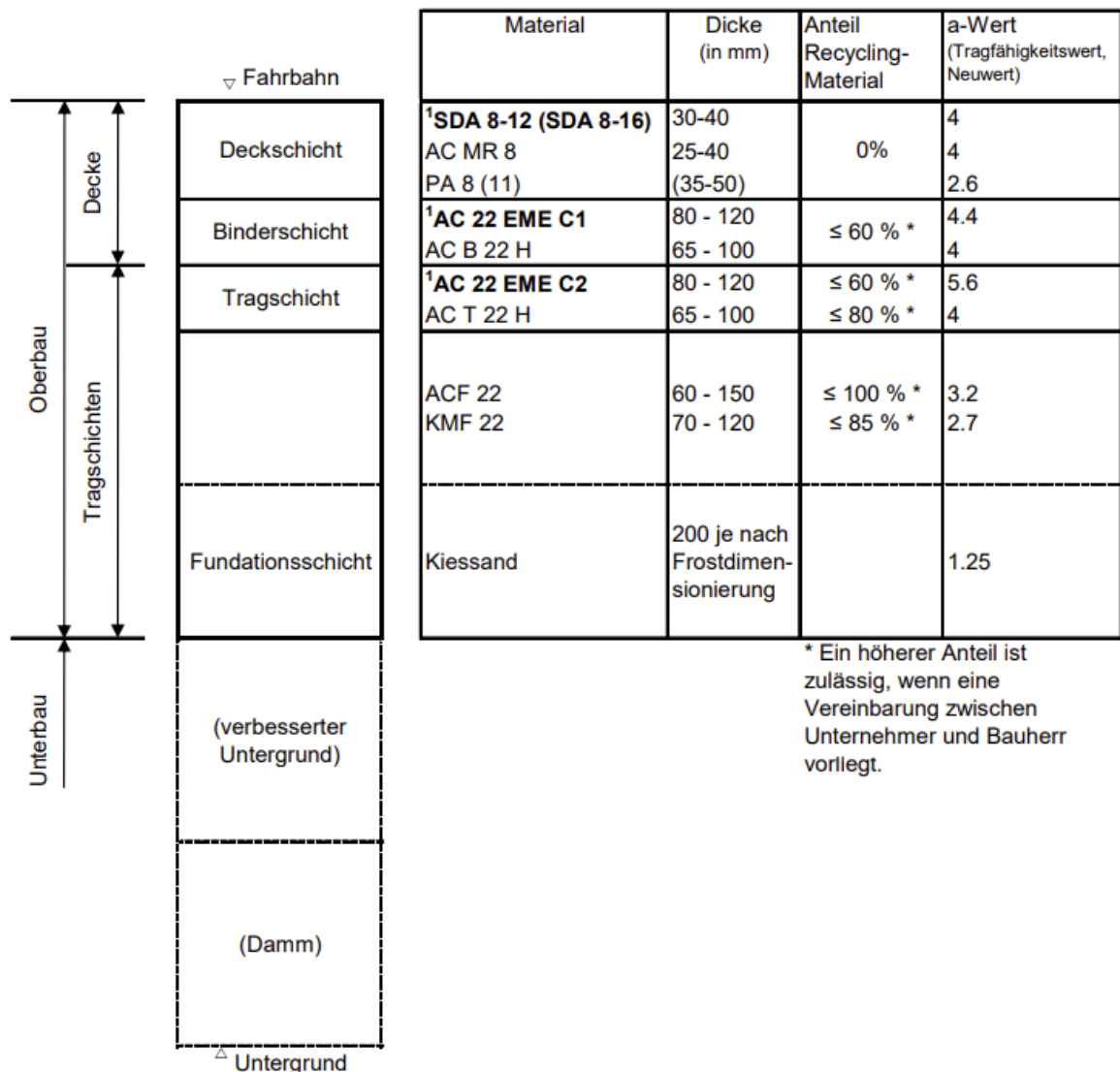


Abbildung 22: Typischer Schichtaufbau von Schweizer Nationalstrassen [94]

Die bauliche Ausgestaltung muss in Abhängigkeit von der Verkehrsbeanspruchung gemäss den VSS Normen 40320:2022-12 [26] und 40324:2019 [27] erfolgen. Daraus ergibt sich für die zu untersuchende Berechnungsvariante CH-1, der zuvor ermittelte Oberbautyp 2 der Verkehrslastklasse T6₂₀ und der Tragfähigkeitsklasse S3.

Im Fachhandbuch Trasse / Umwelt sind keine konkreten Schichtaufbauten definiert, weshalb anhand der aufgeführten Asphaltarten in Abbildung 22 ein Schichtaufbau für Berechnungsvariante CH-1 definiert wird. Die Berechnungsvariante CH-1 wird mit einer 3.0 cm starken SDA 8-12 als Deckschicht und einer 8.0 cm starken AC EME C1 als Binderschicht realisiert. Als Tragschicht wird eine 8.0 cm starke Schicht aus AC 22 EME C2 verwendet. Die Fundamentalschicht wird eine 8.0 cm starke Schicht aus AC 22 EME C2 verwendet. Die Fundamentalschicht wird eine 8.0 cm starke Schicht aus AC 22 EME C2 verwendet.

schicht bildet eine 8.0 cm starke Schicht aus ACF 22. Die Frostschutzschicht wird im Fachhandbuch Trasse / Umwelt mit einer Stärke von 20.0 cm angegeben, je nach Frostdimensionierung. Zwecks Vergleichbarkeit wird für Berechnungsvariante CH-1 ein frostsicherer Aufbau von 57.0 cm definiert. Daraus ergibt sich eine Stärke der Frostschutzschicht von 30.0 cm.

Tabelle 23: Schichtaufbau der Berechnungsvariante CH-1, Bsp. Schweiz

Schicht	Bezeichnung	Schichtdicke [mm]	Recyclinganteil [%]
Asphaltdeckschicht	SDA 8-12	30	0
Asphaltbinderschicht	AC 22 EME C1	80	60
Asphalttragschicht	AC 22 EME C2	80	60
Foundationsschicht	ACF 22	80	95
Frostschutzschicht	UG 0/45 mm (angenähert durch Wandkies I 0/63 mm)	300	100

Für den Bau des Autobahnabschnitts werden ausschliesslich dieselbetriebene Baumaschinen und Lastkraftwagen verwendet. Dies entspricht dem derzeit in der Schweiz am weitesten verbreiteten Antriebssystem. Die Asphaltmischgüter für die Erneuerung des Autobahnabschnitts werden aus nur einer Asphaltmischanlage geliefert, welche in einer Entfernung von 20 km zur Baustelle liegt. Zur Produktion der Asphaltmischgüter wird der durchschnittliche Schweizer Strommix verwendet und die Wärme zur Asphaltproduktion wird aus Erdgas bereitgestellt. Gemäss Daten aus früheren Studien der Umtec Technologie AG wurde von 2013 bis 2023 in Schweizer Asphaltmischanlagen zu 60 % Erdgas und zu 37 % Heizöl als Wärmequelle verwendet [95].

Zwischen den jeweiligen Asphaltschichten wird zur Sicherstellung des Schichtverbundes eine *bituminöse Haftschrift* mit einem Flächengewicht von 0.2 kg/m² eingebaut. (Auf die Haftschrift wird kein Kalkhydrat aufgetragen, weil dies in der Schweiz nicht Usus ist.)

Zur Modellierung des Lebenszyklus werden für die unterschiedlichen Asphaltschichten, falls angegeben, die Nutzungsdauern aus dem Fachhandbuch Trasse / Umwelt entnommen und leicht angepasst. Fehlende Angaben werden aus der Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstrassengesetz und dem Bundeswasserstrassengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung - ABBV) [96] aus Deutschland übernommen.

Tabelle 24: Nutzungsdauern unterschiedlicher Strassenschichten in der Asphaltbauweise, Bsp. Schweiz

Schicht	Theoretische Nutzungsdauer [a] gemäss [94]	Angenommene Nutzungsdauer [a]
Asphaltdeckschicht	20	15
Asphaltbinderschicht	25	30
Asphalttragschicht	Keine Angabe	60
Foundations- und Frostschutzschicht	Keine Angabe	60

Die Nutzungsdauer der Binderschicht wird gegenüber dem Fachhandbuch Trasse / Umwelt um 5 Jahre verlängert damit der Zeitpunkt für den Austausch auf denselben Zeitpunkt fällt wie der zweite Austausch der Deckschicht. Da für die Trag-, Foundations- und Frostschutzschicht keine Angaben vorliegen, werden in Absprache mit dem ASTRA 60 Jahre angesetzt.

Anhand der angenommenen Nutzungsdauern für die unterschiedlichen Asphaltschichten ergibt sich für die Berechnungsvariante CH-1 der Lebenszyklus in Abbildung 23.

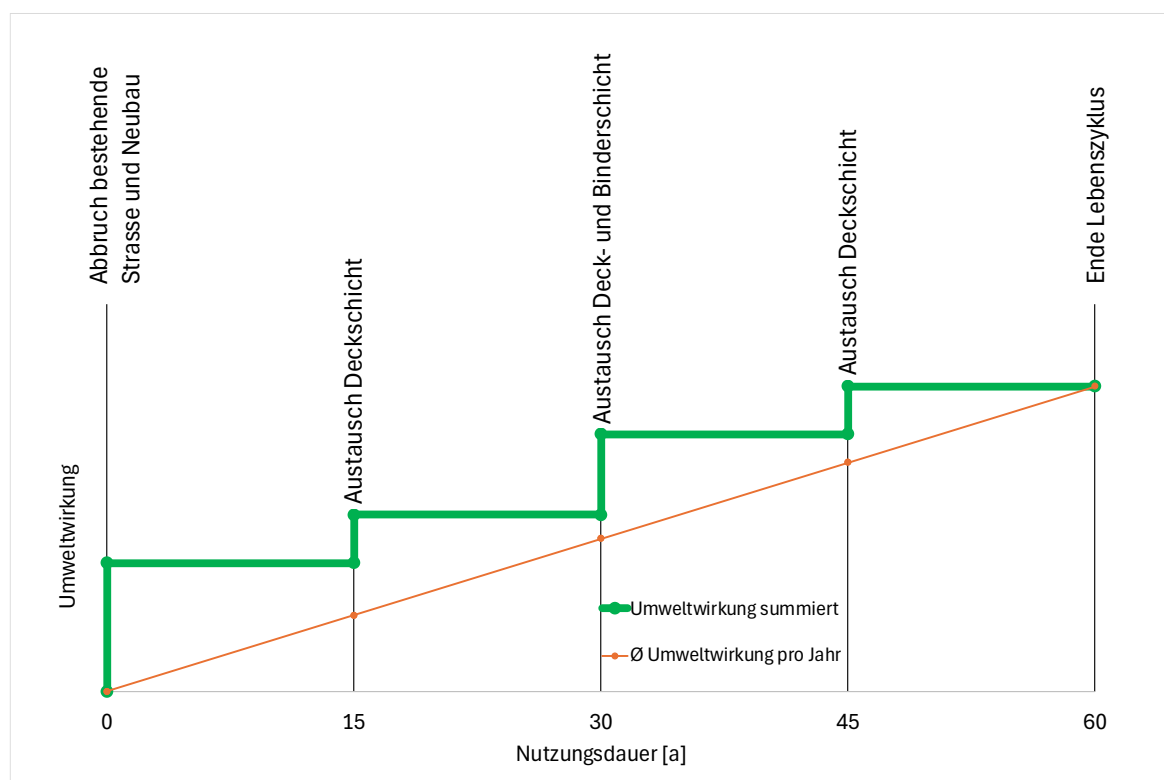


Abbildung 23: Lebenszyklus der Berechnungsvariante CH-1, Bsp. Schweiz

Zu Beginn der Lebenszyklusbetrachtung wird eine bestehende Strasse mittels dieselbetriebener Baumaschinen vollständig zurückgebaut. Der Rückbau erfolgt durch Aufbrechen des

Strassenoberbaus. Es wird angenommen, dass dieser Aufbau identisch zum Neubau (Erneuerung) ist. Der rückgebaute Asphalt wird zu 83 % stofflich recycelt und zu 17 % deponiert. Die Transportdistanz von der Baustelle zur Aufbereitungsanlage (Asphaltemischanlage) beträgt 10 km und die Transportdistanz von der Baustelle zur Deponie beträgt 30 km.

Rund 15 Jahre nach dem Neubau erfolgt ein Austausch der Asphaltdeckschicht. 15 Jahre später, also 30 Jahre nach dem Neubau erfolgt ein Austausch von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht. Der Rückbau geschieht mittels Fräsen. Rund 45 Jahre nach dem Neubau erfolgt ein erneuter Austausch der Asphaltdeckschicht. Nach weiteren 15 Jahren, also 60 Jahre nach dem Neubau hat der Strassenaufbau das Ende seiner technischen Nutzungsdauer (Lebenszyklus) erreicht und der Betrachtungszeitraum endet.

Ein Rückbau wird nicht betrachtet, da dieser bereits zu Beginn der Lebenszyklusbetrachtung im Rahmen der Erneuerung bilanziert wurde. Dieses Szenario widerspiegelt die Realität, da in den meisten Fällen bereits ein bestehender Strassenaufbau vorliegt, welcher ausgetauscht wird.

Für alle beschriebenen Massnahmen erfolgt eine Zustandsprognose der Längsebenheit mithilfe von IRI-Werten vor und nach der Massnahme, und es werden die Änderungsraten vor und nach der Massnahme definiert. Die angesetzten Verbesserungen (Wirkungen) sowie die Änderungsraten wurden, wie bereits zuvor erwähnt, in Anlehnung an das im österreichischen PMS-Handbuch [44] beschriebene nahezu lineare Zustandsprognosemodell mit einem Startwert zwischen 0.5 bis 1.0 m/km sowie einer jährlichen Änderungsrate im Bereich von 0.08 bis 0.13 m/km auch für die Schweiz übernommen. Somit kann auf eine Umrechnung der Standardabweichung der Winkelwerte s_w in den IRI verzichtet werden. Die Werte der Berechnungsvariante CH-1 können der Tabelle 25 entnommen werden.

Tabelle 25: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante CH-1, Bsp. Schweiz

	IRI [m/km]			
Variante CH-1 – Asphalt	M1	M2	M3	M4
Längsebenheit vor der Massnahme	2.4	2.08	2.2	2.72
Änderungsrate Längsebenheit vor der Massnahme	0.08	0.1	0.1	0.1
Längsebenheit nach der Massnahme	0.8	1	0.8	1
Änderungsrate Längsebenheit nach der Massnahme	0.12	0.12	0.12	0.12

Als Eingangsgrössen für die ökonomische Bewertung der Lebenszykluskosten müssen die Kosten der Massnahmen angegeben werden (auf der Grundlage des Forschungsprojekts

TAniA [1]). Die Kosten für Berechnungsvariante CH-1 sind in Tabelle 26 dargestellt. Die Valorisierung wird mit 2.5 % angenommen und der Diskontierungszinssatz beträgt 3 %.

Tabelle 26: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante CH-1, Bsp. Schweiz

Variante CH-1 – Asphalt	Jahr	Kosten [CHF]
M1 – Neubau (Erneuerung)	0	28'125'000
M2 – Austausch Asphaltdeckschicht	15	5'625'000
M3 – Austausch Asphaltdeck- und -binderschicht	30	11'250'000
M4 – Austausch Asphaltdeckschicht	45	5'625'000''000

8.3.1.2 Berechnungsvariante CH-2 (Asphaltbauweise)

Da in der Schweiz die Asphaltbauweise beim Bau von Nationalstrassen den Regelfall darstellt, wird für die Berechnungsvariante CH-2 nochmals ein Schichtaufbau in Asphaltbauweise definiert. Der Schichtaufbau von Berechnungsvariante CH-2 wird wiederum aus dem Fachhandbuch Trasse / Umwelt des ASTRA übernommen [94]. Die bauliche Ausgestaltung entspricht ebenfalls dem Oberbautyp 2 der Verkehrslastklasse T₆₂₀ und der Tragfähigkeitsklasse S3, wobei die Asphalt-schichten 20 mm dicker ausgestaltet werden als in der VSS Norm 40324:2019 [27] definiert. Im Vergleich zur Berechnungsvariante CH-1 wird eine andere Deckschicht verwendet und die Dicken der jeweiligen Schichten werden gemäss den Vorgaben des ASTRA ebenfalls entsprechend angepasst (Tabelle 27).

Tabelle 27: Schichtaufbau der Berechnungsvariante CH-2, Bsp. Schweiz

Schicht	Bezeichnung	Schichtdicke [mm]	Recyclinganteil [%]
Asphaltdeckschicht	AC MR 8	30	0
Asphaltbinderschicht	AC 22 EME C1	90	60
Asphalttragschicht	AC 22 EME C2	100	60
Foundationsschicht	ACF 22	80	95
Frostschutzschicht	UG 0/45 mm (angenähert durch Wandkies I 0/63 mm)	300	100

Die Berechnungsvariante CH-2 wird mit einer 3.0 cm starken Deckschicht mit der Asphaltmischgutsorte AC MR 8 und einer 9.0 cm starken Binderschicht aus AC 22 EME C1 realisiert. Als Tragschicht wird AC 22 EME C2 mit einer Schichtdicke von 10.0 cm verwendet. Analog zu Berechnungsvariante CH-1 wird eine Foundationsschicht ACF 22 mit einer Stärke von 8.0 cm verwendet. Die Stärke der Frostschutzschicht beträgt 30 cm.

Für den Bau des Autobahnabschnitts werden ausschliesslich dieselbetriebene Baumaschinen und Lastkraftwagen verwendet. Dies entspricht dem derzeit am weitesten verbreiteten Antriebssystem. Die Asphaltmischgüter für die Erneuerung des Autobahnabschnitts werden aus einer Asphaltmischanlage geliefert, welche in einer Entfernung von 20 km zur Baustelle liegt. Zur Produktion der Asphaltmischgüter wird der durchschnittliche Schweizer Strommix verwendet und die Wärme zur Asphaltproduktion wird aus Erdgas bereitgestellt.

Zwischen den jeweiligen Asphaltsschichten wird zur Sicherstellung des Schichtverbundes eine bituminöse Haftschiicht mit einem Flächengewicht von 0.2 kg/m² eingebaut. (Auf die Haftschiicht wird kein Kalkhydrat aufgetragen, weil dies in der Schweiz nicht Usus ist.)

Zur Modellierung des Lebenszyklus werden für die unterschiedlichen Asphaltsschichten, falls angegeben, wiederum die Nutzungsdauern aus dem Fachhandbuch Trasse / Umwelt entnommen und leicht angepasst. Fehlende Angaben werden aus der Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstrassengesetz und dem Bundeswasserstrassengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung - ABBV) [96] aus Deutschland übernommen.

Tabelle 28: Nutzungsdauern unterschiedlicher Strassenschichten in der Asphaltbauweise, Bsp. Schweiz

Schicht	Theoretische Nutzungsdauer [a] gemäss [94]	Angenommene Nutzungsdauer [a]
Asphaltdeckschicht	20	15
Asphaltbinderschicht	25	30
Asphalttragschicht	Keine Angabe	60
Foundations- und Frostschiuttschicht	Keine Angabe	60

Die Nutzungsdauer der Binderschicht wird gegenüber dem Fachhandbuch Trasse / Umwelt um 5 Jahre verlängert und die Nutzungsdauer der Deckschicht um 5 Jahre verkürzt, damit der Zeitpunkt für den Austausch auf denselben Zeitpunkt fällt wie für den zweiten Austausch der Deckschicht. Da für die Trag-, Foundations- und Frostschiuttschicht keine Angaben vorliegen, werden in Absprache mit dem ASTRA 60 Jahre angesetzt.

Anhand der angenommenen Nutzungsdauern für die unterschiedlichen Asphaltsschichten ergibt sich für die Berechnungsvariante CH-2 derselbe Lebenszyklus wie für Berechnungsvariante CH-1, siehe dazu Abbildung 23. Damit ist auch ein direkter Vergleich der beiden Berechnungsvarianten möglich und es kann gezeigt werden, welchen Einfluss die Wahl der Asphaltssorten auf die Ergebnisse hat.

Zu Beginn der Lebenszyklusbetrachtung wird eine bestehende Strasse mittels dieselbetriebener Baumaschinen vollständig zurückgebaut. Der Rückbau erfolgt durch Aufbrechen des Strassenoberbaus. Es wird angenommen, dass dieser Aufbau identisch zum Neubau (Erneuerung) ist. Der rückgebaute Asphalt wird zu 83 % stofflich recycelt und zu 17 % deponiert. Die Transportdistanz von der Baustelle zur Aufbereitungsanlage (Asphaltemischanlage) beträgt 10 km und die Transportdistanz von der Baustelle zur Deponie beträgt 30 km.

Rund 15 Jahre nach dem Neubau erfolgt ein Austausch der Asphaltdeckschicht. Weitere 15 Jahre später, also 30 Jahre nach dem Neubau erfolgt ein Austausch von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht. Nach weiteren 15 Jahren, also 45 Jahre nach dem vollständigen Neubau findet ein erneuter Austausch der Deckschicht statt. Rund 60 Jahre nach dem Neubau hat der Strassenaufbau das Ende seiner technischen Nutzungsdauer (Lebenszyklus) erreicht und der Betrachtungszeitraum endet. Ein Rückbau wird nicht betrachtet, da dieser bereits zu Beginn der Lebenszyklusbetrachtung im Zuge der Erneuerung bilanziert wurde.

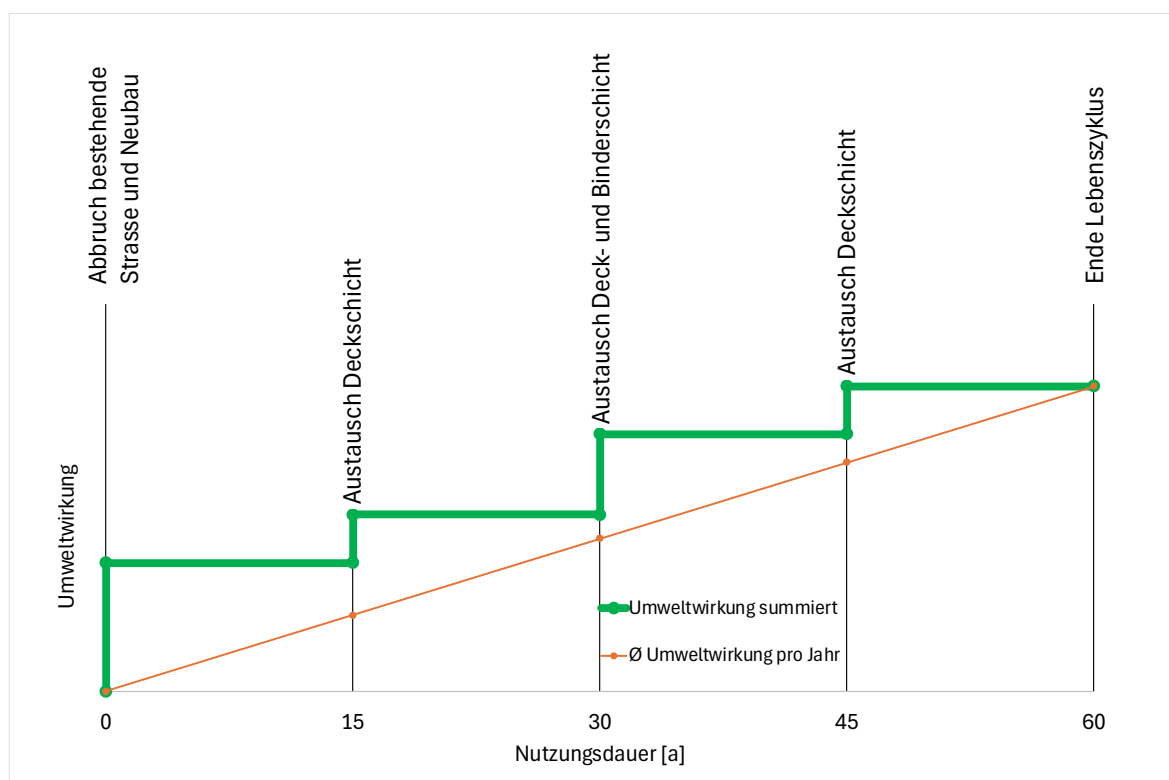


Abbildung 24: Lebenszyklus der Berechnungsvariante CH-2, Bsp. Schweiz

Für alle beschriebenen Massnahmen erfolgt eine Zustandsprognose der Längsebenheit mithilfe von IRI-Werten vor und nach der Massnahme, und es werden die Änderungsraten vor

und nach der Massnahme definiert. Für alle beschriebenen Massnahmen wird die Zustandsprognose der Längsebenheit erneut einheitlich auf Basis von IRI-Werten vor und nach der Massnahme sowie der jeweiligen Änderungsraten vor und nach der Massnahme definiert. Diese Festlegung wurde ebenfalls in identischer Form unter Heranziehung der Empfehlungen des österreichischen PMS-Handbuchs [44] gewählt. Die Werte der Berechnungsvariante CH-2 können der Tabelle 29 entnommen werden.

Tabelle 29: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante CH-2, Bsp. Schweiz

Variante CH-2 – Asphalt	IRI [m/km]			
	M1	M2	M3	M4
Längsebenheit vor der Massnahme	2.4	2.08	2.2	2.72
Änderungsrate Längsebenheit vor der Massnahme	0.08	0.1	0.1	0.1
Längsebenheit nach der Massnahme	0.8	1	0.8	1
Änderungsrate Längsebenheit nach der Massnahme	0.12	0.12	0.12	0.12

Als Eingangsgrössen für die ökonomische Bewertung der Lebenszykluskosten müssen die Kosten der Massnahmen angegeben werden. Die Kosten für Berechnungsvariante CH-2 sind in Tabelle 30 dargestellt. Die Valorisierung wird mit 2.5 % angenommen und der Diskontierungszinssatz beträgt 3 %.

Tabelle 30: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante CH-2, Bsp. Schweiz

Variante CH-2 – Asphalt	Jahr	Kosten [CHF]
M1 – Neubau (Erneuerung)	0	28'125'000
M2 – Austausch Asphaltdeckschicht	20	5'625'000
M3 – Austausch Asphaltdeck- und -binderschicht	40	11'250'000
M4 – Austausch Asphaltdeckschicht	60	5'625'000

8.3.2 Ergebnisse

Ziel der Beispielrechnungen für die Schweiz ist der direkte Vergleich zweier unterschiedlicher Oberbauvarianten in Asphaltbauweise. Da Hochleistungsstrassen in der Schweiz überwiegend in Asphaltbauweise erstellt werden, wird auf eine Variante in Betonbauweise verzichtet. Die Gegenüberstellung der beiden Varianten in Asphaltbauweise soll keine Entscheidungs-

grundlage für die eine oder andere Variante sein. Vielmehr sollen die Möglichkeiten und Grenzen des SABINA-Bilanzrechners für eine fundierte Entscheidungsgrundlage aufgezeigt werden.

Eine Gegenüberstellung von zwei Varianten bedingt, dass die technische Nutzungsdauer in beiden Varianten identisch ist. Im SABINA-Bilanzrechner können innerhalb eines Projekts nur Varianten verglichen werden, welche dieselbe technische Nutzungsdauer aufweisen. Sollte dies nicht der Fall sein, kann trotzdem ein grober Vergleich aufgestellt werden. Dazu müssen im SABINA-Bilanzrechner zwei unterschiedliche Projekte erstellt werden.

Im vorliegenden Beispiel ist die technische Nutzungsdauer beider Varianten identisch. Die *Basisvariante* entspricht dabei der Berechnungsvariante CH-1 (siehe 8.3.1.1) und die *Vergleichsvariante* der Berechnungsvariante CH-2 (siehe 8.3.1.2).

8.3.2.1 Ökonomische Bewertung

Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung für die beiden Asphaltvarianten. Zwischen den beiden Varianten in Asphaltbauweise ergeben sich keine Unterschiede. Sowohl die Kapitalwerte und Annuitäten als auch die Kosten der einzelnen Massnahmen sind in beiden Varianten identisch. Dies liegt daran, dass in beiden Varianten identische Lebenszyklen sowie Erhaltungsmassnahmen und -intervalle angenommen wurden.

Innerhalb der gesamten Analyseperiode von 60 Jahren ergeben sich Unterschiede (unterer Bereich in Abbildung 25). Die Anfangsinvestition zu Beginn der Analyseperiode schlägt wie erwartet mit den höchsten Kosten zu Buche. Die beiden Deckschichtmassnahmen nach 15, bzw. 45 Jahren verursachen die geringsten Kosten. Die Kosten der Deckenerneuerung (Austausch Deck- und Binderschicht), welche nach 30 Jahren stattfindet, ordnen sich preislich in der Mitte ein.

Die entscheidende Einflussgrösse für eine Verbesserung der ökonomischen Bewertung liegt einerseits bei den geschätzten Massnahmenkosten und andererseits in der Wahl des Lebenszyklus mit den damit verbundenen Erhaltungsmassnahmen und -intervallen. Einsparungspotentiale ergeben sich insbesondere durch eine Verlängerung der Erhaltungsintervalle, sofern die am Ende dieser Intervalle durchzuführenden Massnahmen nicht intensiver ausfallen. Dies ist in vielen Fällen nur dann realisierbar, wenn entweder Materialien höherer Qualität verwendet werden, die Bauausführung die Mindestanforderungen deutlich übertrifft oder der Oberbau eine höhere Belastbarkeit als rechnerisch erforderlich aufweist. Im Umkehrschluss führt dies jedoch häufig zu höheren Anfangsinvestitionen. Daher ist nicht der Kapitalwert, sondern die

Annuität die entscheidende Bewertungsgrösse zur Quantifizierung von Optimierungs- und Einsparpotenzialen.

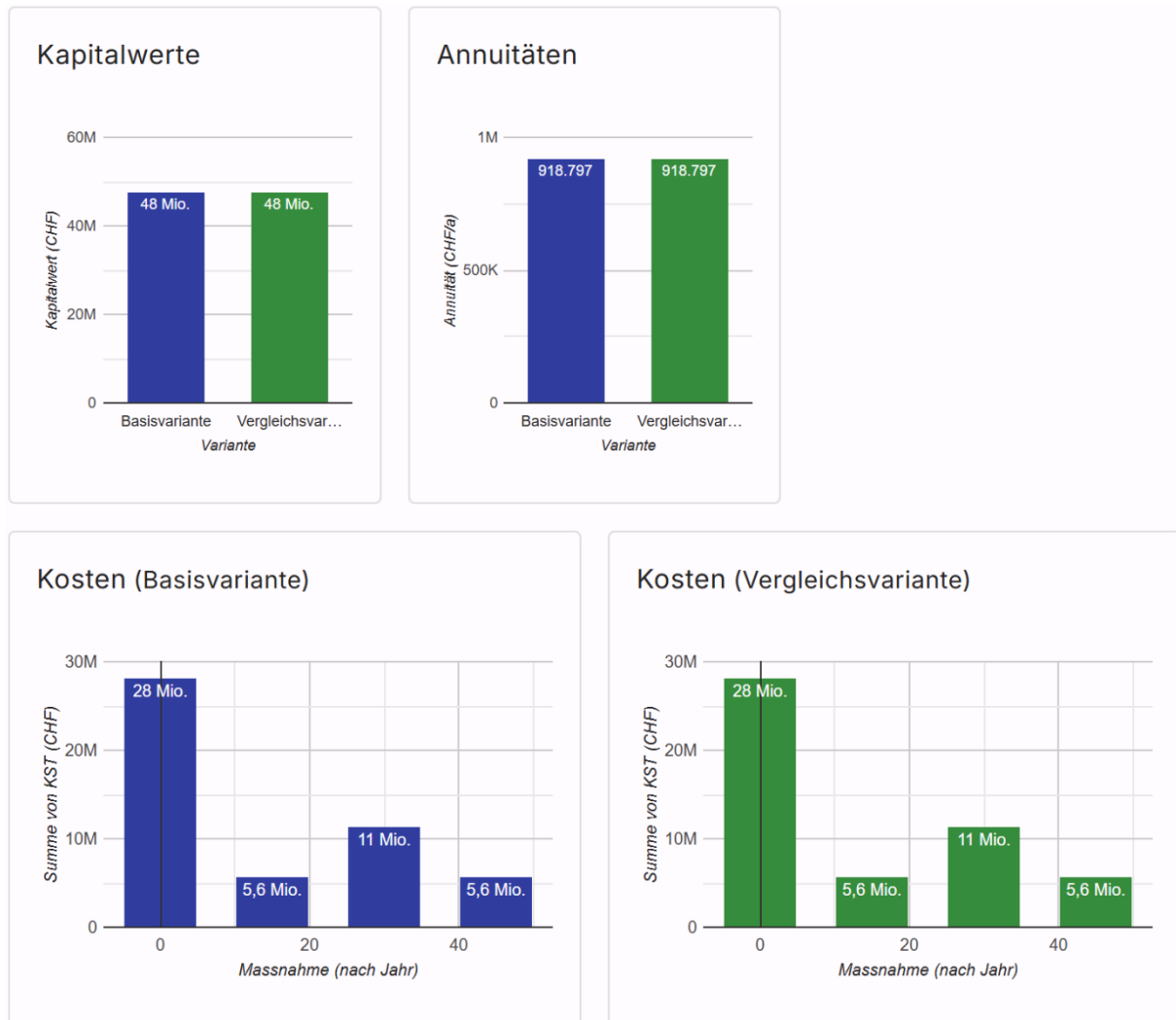


Abbildung 25: Ökonomische Bewertung, Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)

8.3.2.2 Ökologische Bewertung

Für die ökologische Bewertung der beiden Varianten in Asphaltbauweise wurde die Wirkungsabschätzungsmethode des *Global Warming Potential* (GWP) gewählt. Die Abbildung 26 zeigt die Umweltauswirkungen, welche sich über die gesamte Analyseperiode direkt aus den Bau-massnahmen ergeben. Die Unterschiede liegen sowohl in der Gesamtökobilanz als auch bei den ökologischen Annuitäten in einem Streubereich $\pm 10\%$ mit etwas geringeren Treibhausgasemissionen bei der Basisvariante (Berechnungsvariante CH-1). Die Unterschiede zwi-

schen den beiden Varianten sind auf unterschiedliche Asphaltmischgutsorten und Schichtstärken zurückzuführen. Da die technische Nutzungsdauer in beiden Varianten identisch ist, können sowohl der Gesamtwert als auch die Öko-Annuität für die Bewertung und den Vergleich in gleicher Weise herangezogen werden.

Die detaillierte ökologische Betrachtung der einzelnen Baumassnahmen während der Analyseperiode zeigt, dass die Baumassnahmen der Basisvariante (Berechnungsvariante CH-1) leicht tiefere Treibhausgasemissionen aufweisen als die Baumassnahmen der Vergleichsvariante (Berechnungsvariante CH-2). Wie bereits in der ökonomischen Betrachtung verursacht der Neubau zu Beginn der Analyseperiode die höchsten Treibhausgasemissionen, gefolgt von der Deckenerneuerung (Austausch Deck- und Binderschicht) nach 30 Jahren. Die beiden Deckschichtmassnahmen nach 15, bzw. 45 Jahren verursachen die geringsten Umweltwirkungen. Da in den baulichen Erhaltungsmassnahmen nur Teile des Strassenaufbaus ersetzt werden, wird in diesen Massnahmen weniger Asphaltmischgut verwendet und die Treibhausgasemissionen sind entsprechend tiefer als beim Neubau zu Beginn der Analyseperiode.

Ob dennoch signifikante Unterschiede in bestimmten Teilbewertungen bestehen, kann durch die getrennte Betrachtung der einzelnen Phasen (Herstellung, Errichtung und Entsorgung) analysiert werden.

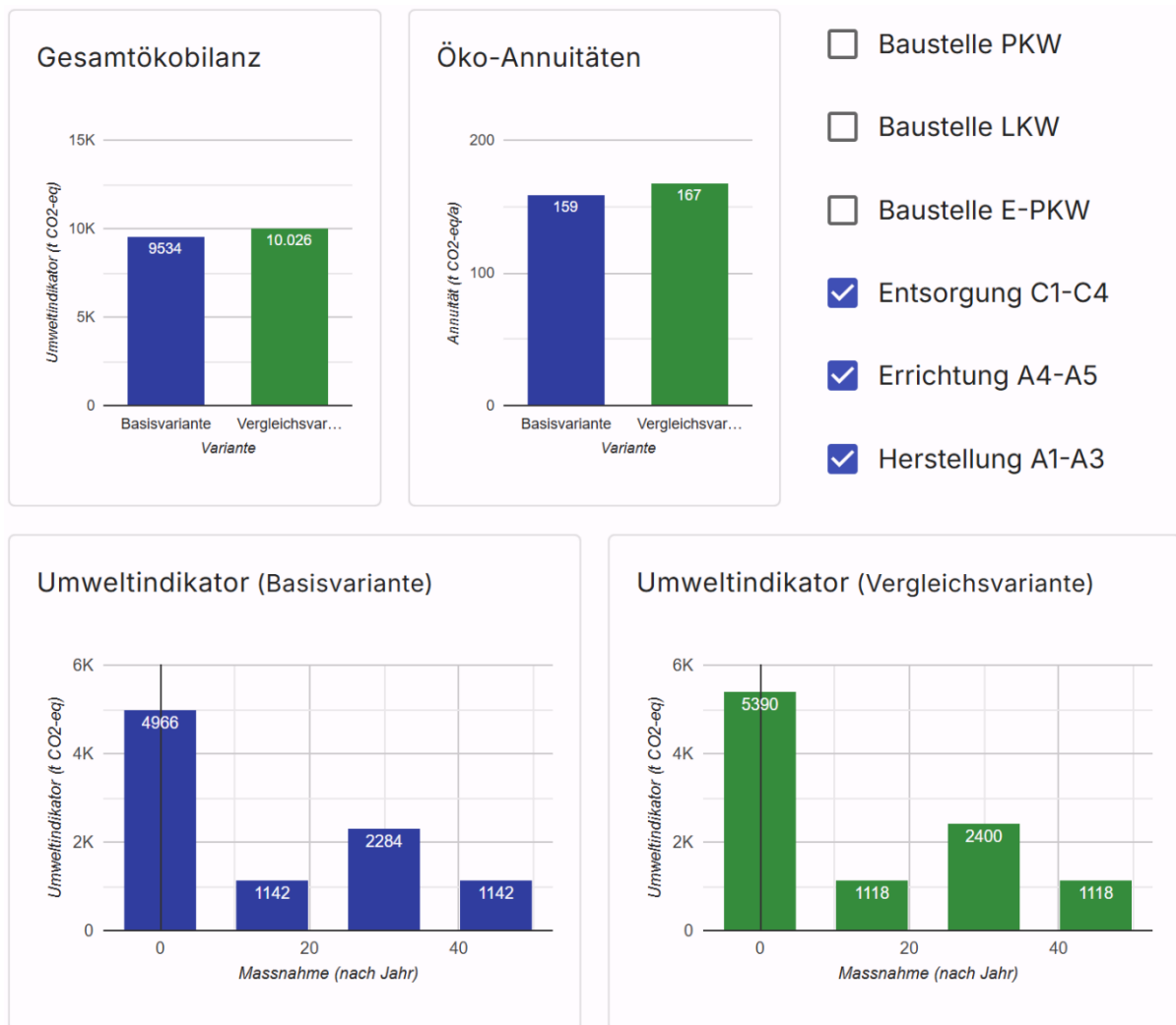
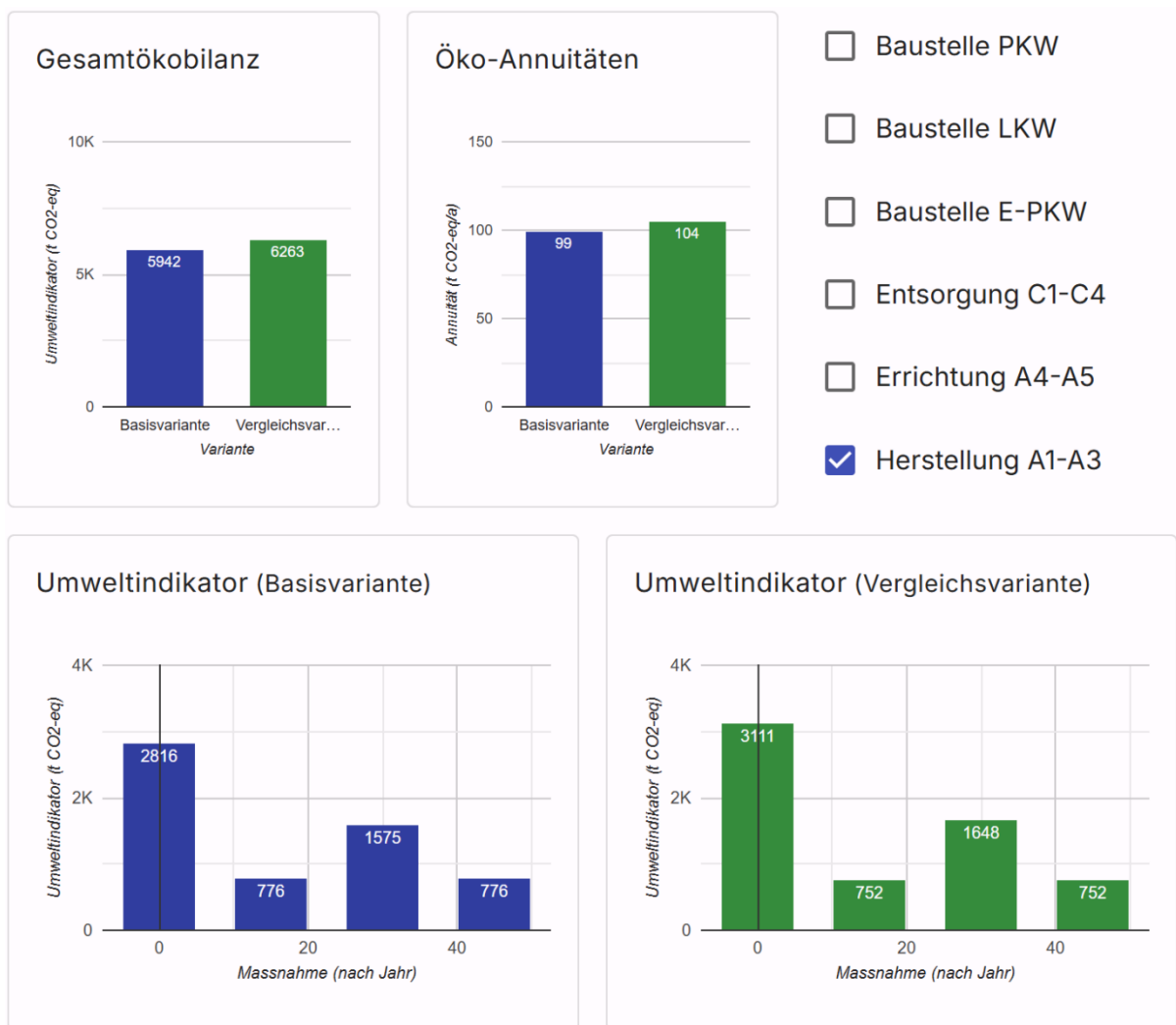


Abbildung 26: Ökologische Bewertung, Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)

In Abbildung 27 wird zunächst nur die Lebenszyklusphase der Herstellung (Module A1 bis A3) betrachtet. Abermals weist die Basisvariante leicht tiefere Treibhausgasemissionen auf als die Vergleichsvariante. Die Differenz ergibt sich durch die unterschiedliche Deckschicht sowie der unterschiedlichen Schichtstärken der bitumengebundenen Schichten. Die Gesamtstärke der bitumengebundenen Schichten liegt in der Vergleichsvariante leicht höher als in der Basisvariante, wodurch mehr Asphaltmischgut verbaut wird. Dies zeigt sich in sämtlichen Baumassnahmen über die gesamte Analyseperiode gleichermassen. Beim Neubau zu Beginn der Analyseperiode wird der gesamte Strassenaufbau erstellt, in den baulichen Erhaltungsmassnahmen werden jeweils nur Teile davon ausgetauscht. Entsprechend ergeben sich in den baulichen Erhaltungsmassnahmen tiefere Treibhausgasemissionen durch die Herstellung der Asphaltmischgüter.

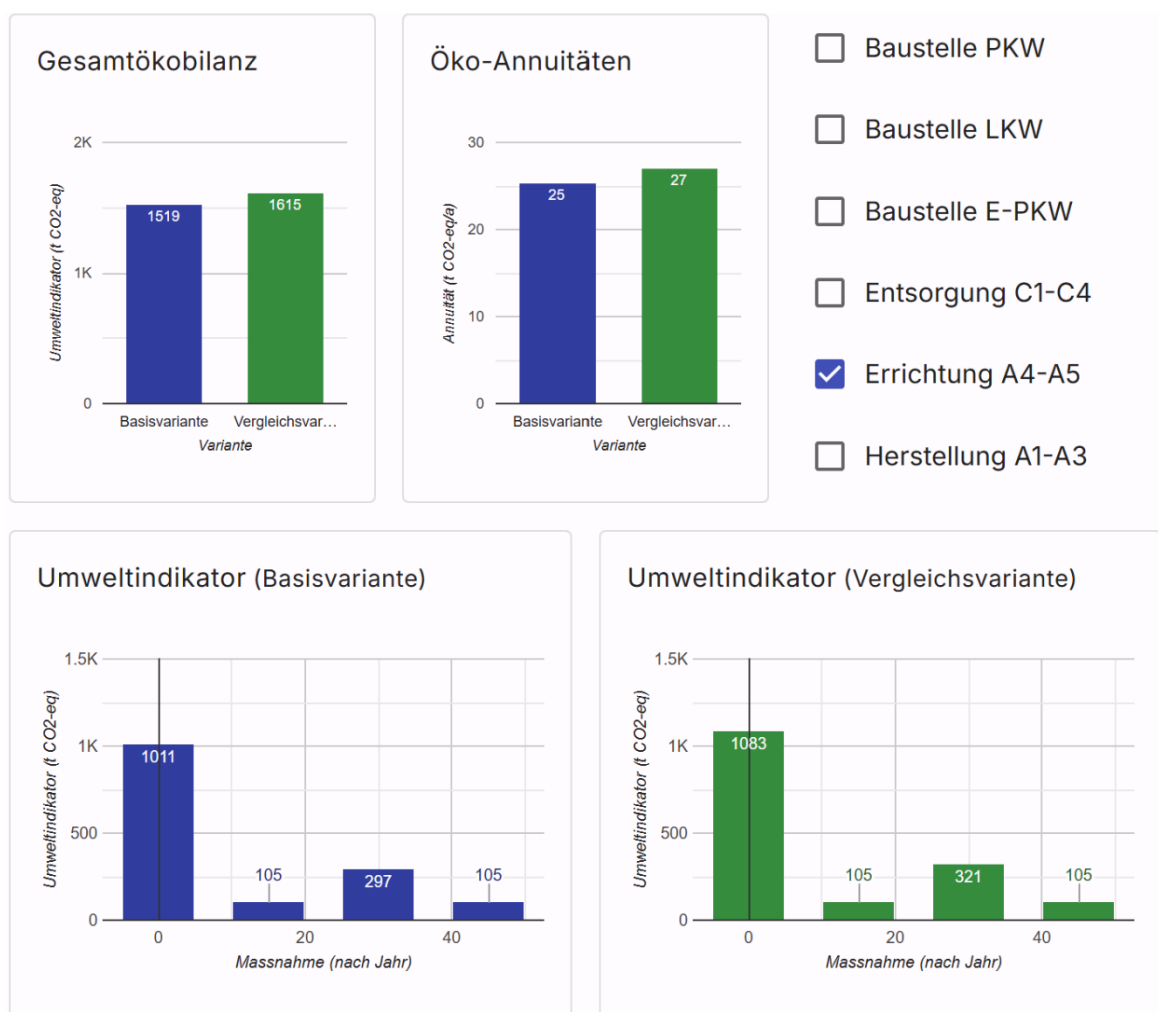


**Abbildung 27: Ökologische Bewertung Teil Herstellung (Module A1 bis A3), Bsp. Schweiz
(© SABINA-Bilanzrechner)**

Bei Vergleich der Errichtung (Module A4 bis A5) zeigt sich ein ähnliches Bild. Abermals weist die Basisvariante leicht tiefere Treibhausgasemissionen auf als die Vergleichsvariante. Die Begründung für diese Differenz liegt abermals in der unterschiedlichen Schichtstärke der bitumengebundenen Schichten. Die Vergleichsvariante weist eine leicht höhere Schichtstärke der bitumengebundenen Schichten auf, woraus leicht höhere Treibhausgasemissionen während der Errichtung resultieren.

In der detaillierten Betrachtung der einzelnen Baumassnahmen fällt auf, dass der Neubau zu Beginn der Analyseperiode im Vergleich zu den darauffolgenden Baumassnahmen signifikant höhere Treibhausgasemissionen verursacht. Im Vergleich der Herstellung (vgl. Abbildung 27) ist dieser Effekt weniger deutlich ausgeprägt. Die Begründung liegt in der Errichtung der un-

gebundenen Schicht zu Beginn der Analyseperiode. Durch ihre grosse Schichtstärke, verursacht die ungebundene Schicht hohe Treibhausgasemissionen in der Errichtung. Da die ungebundene Schicht jedoch kein Bitumen enthält, verursacht sie in der Herstellung im Vergleich zu den bitumengebundenen Schichten nur geringe Treibhausgasemissionen. Da die Errichtung im Vergleich zum Anteil der Herstellung gesamthaft nur geringe Treibhausgasemissionen verursacht (ca. 20 %) und die ungebundene Schicht durch ihre hohe technische Nutzungsdauer nur geringe jährliche Treibhausgasemissionen (Öko-Annuität) verursacht, sind Einsparungs- und Optimierungspotenziale nur bedingt vorhanden.



**Abbildung 28: Ökologische Bewertung Teil Errichtung (Module A4 bis A5), Bsp. Schweiz
(© SABINA-Bilanzrechner)**

Bei Vergleich der Entsorgung (Module C1 bis C4) zeigt sich ein identisches Bild wie bei der Errichtung, weshalb auf detaillierte Erläuterungen an dieser Stelle verzichtet wird. Die Entsorgung verursacht über die gesamte Analyseperiode einen Anteil von ca. 20 % der gesamten

Treibhausgasemissionen.

Die Analyse verdeutlicht, wo aus ökologischer Sicht Einsparungs- und Optimierungspotenziale bestehen und wo Änderungen in den Eingangswerten auch zu Änderungen in den Ergebnissen führen. Dies ist primär in den Herstellungsphasen (Module A1 bis A3) und somit bei der Auswahl der Oberbaumaterialien, deren Dimensionierung sowie ihrer Bearbeitungsprozesse (z. B. verwendeter Wärmemix in der Asphaltmischanlage). In der Errichtung und der Entsorgung ergeben sich Einsparungs- und Optimierungspotenziale hauptsächlich durch die Wahl der verwendeten Antriebssysteme für Baumaschinen und Transportmittel, der Reduktion von Transportdistanzen sowie einer möglichst hohen Recyclingquote des Rückbauasphaltes. Im Beispiel ist dieser Effekt allerdings nicht sichtbar, weil in beiden Berechnungsvarianten jeweils dieselben Antriebssysteme, Recyclingquoten etc. verwendet wurden.

Der SABINA-Bilanzrechner ermöglicht neben der Bilanzierung der direkten Umweltwirkungen auch eine Abschätzung über die indirekten Auswirkungen. Diese indirekten Auswirkungen entsprechen den Auswirkungen, welche die Baustelle während der Bauzeit auf den Verkehr hat. Die Abbildung 29 zeigt die ökologischen Auswirkungen der Baumaßnahmen auf den Verkehr und die daraus abgeschätzten negativen und positiven Wirkungen über die gesamte Analyseperiode.

Aufgrund identischer Annahmen bezüglich der Verkehrsdaten in der Basis- und der Vergleichsvariante zeigt sich kein Unterschied in der verkehrsbedingten Umweltbelastung der beiden betrachteten Varianten. Allerdings zeigt sich in Abbildung 29 für beide Varianten, dass die Baustelle in der Gesamtökobilanz und der Öko-Annuität zu negativen Treibhausgasemissionen beim Verkehr führt. Dies ist auf die Geschwindigkeitsreduktion innerhalb der Baustelle zurückzuführen. Durch die reduzierte Geschwindigkeit innerhalb der Baustelle verbraucht der Verkehr weniger Treibstoff, wodurch die Treibhausgasemissionen des Verkehrs während der Bauzeit sinken. Es ist zu beachten, dass der Verkehr in Summe immer noch Treibhausgasemissionen emittiert. Die Einsparungen entsprechen nur der Differenz zwischen den verkehrsbedingten Emissionen mit Baustelle und der Situation, wenn keine Baustelle vorhanden wäre und der Verkehr mit der signalisierten Höchstgeschwindigkeit fließt.

Bei detaillierter Betrachtung der einzelnen Baumaßnahmen über die gesamte Analyseperiode zeigt sich, dass die Einsparung bei der ersten Baumaßnahme am höchsten ist. Auch die Deckschichtmaßnahme nach 15 Jahren und die Deckenerneuerung (Austausch Deck- und Binderschicht) nach 30 Jahren führen zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen durch den Verkehr während der Bauzeit. In der Deckschichtmaßnahme nach 45 Jahren verursacht

die Baustelle keine Einsparungen mehr, sie führt gar zu höheren Treibhausgasemissionen. Der Grund hierfür ist, dass durch die angenommene Zuwachsrates des Verkehrs die Verkehrskapazität im Baustellenbereich nicht mehr ausreicht und es zu Staubildung kommt. Die staubedingte Geschwindigkeitsreduktion im Baustellenbereich führt zu erhöhtem Treibstoffverbrauch und dadurch zu höheren Treibhausgasemissionen während der Bauzeit. Je geringer die Produktivität der Baumaßnahme und je länger die Dauer von Einrichtung und Abbau der Baustelle, desto länger dauert die Bauzeit und desto mehr Staustunden ergeben sich durch die Baustelle, wenn die Verkehrskapazität im Baustellenbereich nicht ausreicht. Da Fahrzeuge bei niedriger Geschwindigkeit mehr Treibstoff verbrauchen als bei 60 bis 90 km/h, führt Stau zu einem erhöhten Treibstoffverbrauch und damit auch zu höheren Treibhausgasemissionen.

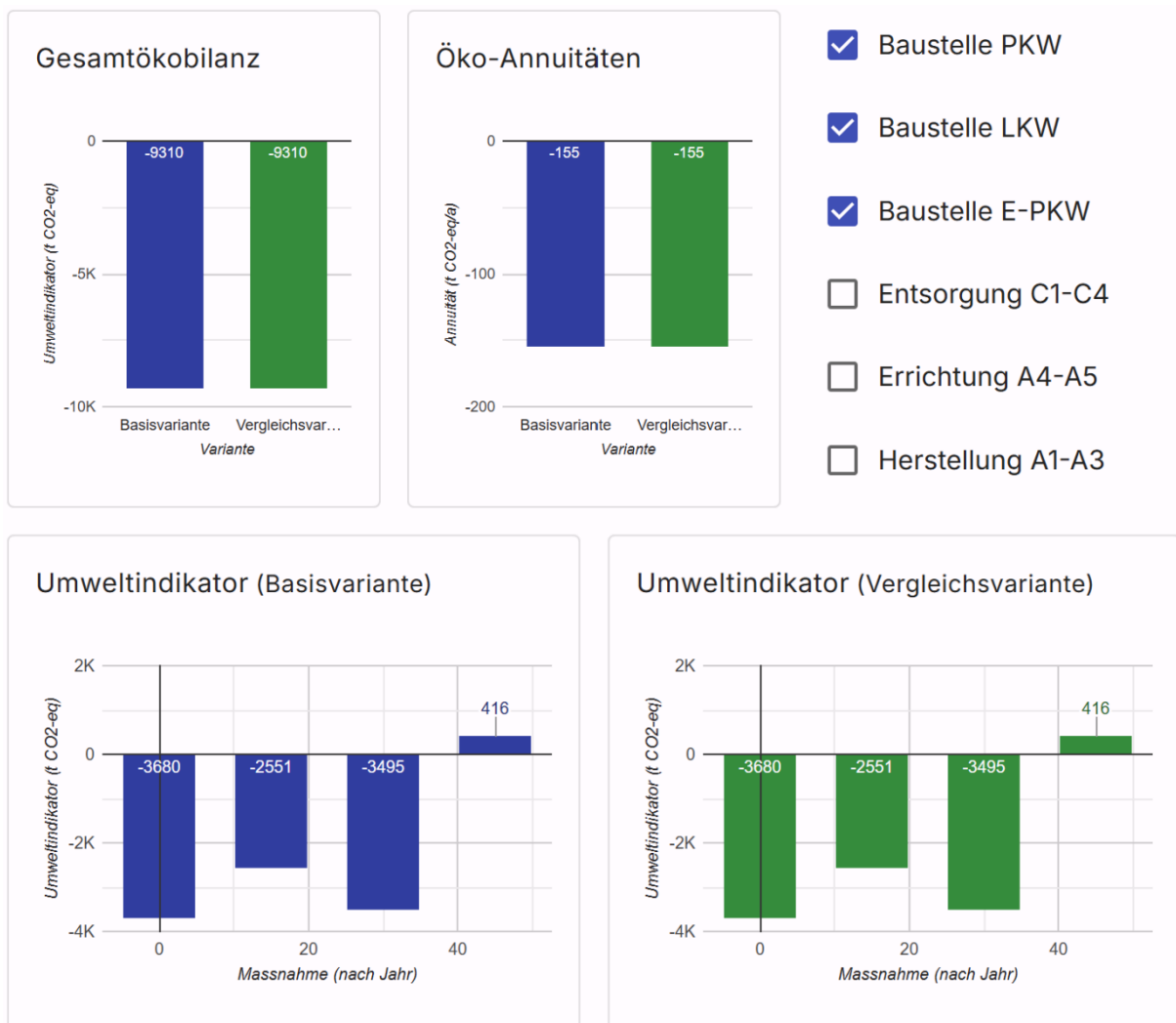


Abbildung 29: Ökologische Bewertung Wirkung Baustelle auf Verkehr (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)

Dieses Beispiel zeigt, welches Einsparungs- und Optimierungspotenzial in der Verhinderung von Staubildung durch eine effiziente Ausgestaltung der Baustelle und im Falle von Staubildung, einer möglichst kurzen Bauzeit liegt. Eine Reduktion der Verkehrsbelastung lässt sich nur durch eine Umleitung des Verkehrs umsetzen. Im vorliegenden Beispiel wurde eine Umleitung des Verkehrs von 2 % angenommen. Negative Umweltwirkungen, welche sich gegebenenfalls aus der Umleitung des Verkehrs ergeben, werden im SABINA-Bilanzrechner aktuell nicht abgebildet.

Werden alle Ergebnisse der ökologischen Betrachtung zusammengefasst (Abbildung 30), zeigt sich, dass die Basisvariante (Berechnungsvariante CH-1) leicht tiefere Treibhausgasemissionen verursacht als die Vergleichsvariante (Berechnungsvariante CH-2).

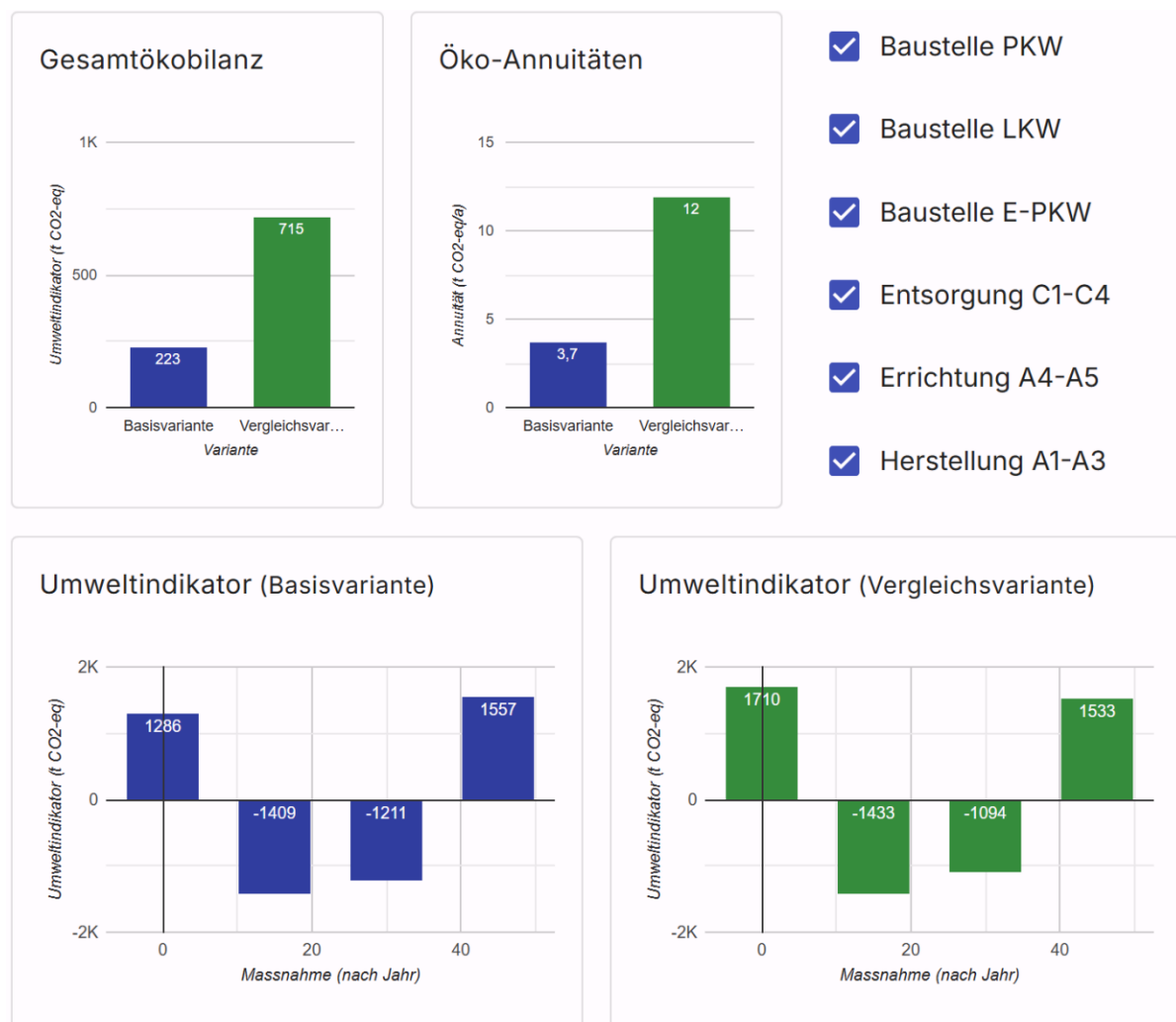


Abbildung 30: Ökologische Bewertung aller Wirkungen (alle Fahrzeugkategorien und alle Phasen), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)

Da die Verkehrsdaten in beiden Varianten identisch sind, ist diese Differenz auf die unterschiedlichen Asphaltmischgüter, die unterschiedlichen Schichtstärken und die damit verbundenen unterschiedlichen Bau- und Transportaufwände zurückzuführen. Die baustellenbedingte Reduktion der Treibhausgasemissionen durch den Verkehr, führt in beiden Varianten gleichermassen zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen.

Durch die in beiden Varianten in Summe tieferen Treibhausgasemissionen, steigt die relative Differenz der Treibhausgasemissionen in der Gesamtökobilanz und der Öko-Annuität von ca. 8 % auf ca. 20 %.

8.3.2.3 Beurteilung der Langzeitwirkungen

Der SABINA-Bilanzrechner ermöglicht auch die Betrachtung von Langzeitwirkungen, insbesondere die Verbesserungseffekte und die damit verbundenen möglichen (theoretischen) Einsparungen, die durch die Erhaltungsmassnahmen je Erhaltungsintervall erzielt werden könnten. Im Vergleich zur Bewertung von Baumassnahmen unterscheiden sich hierbei jedoch die zugrunde liegenden Eingangsgrössen, da sie im Regelfall eine andere Genauigkeits- bzw. Qualitätsstufe aufweisen.

Es wird auf keinen Fall empfohlen, die Auswirkungen aus Bau und Verkehr mit den Einsparungen aus der Langzeitwirkung gegenzurechnen, da, wie bereits zuvor erwähnt, die zugrunde liegenden Eingangsgrössen eine andere Genauigkeits- bzw. Qualitätsstufe aufweisen und da die berechneten Werte lediglich die relative Wirkung, also das mögliche Einsparungspotenzial zwischen dem *Nichts-Tun* im jeweiligen Erhaltungsintervall und der Langzeitwirkung durch die Massnahme darstellen. Die gesamten Wirkungen des Verkehrs auf die Treibhausgasemissionen über die gesamte technische Nutzungsdauer sind in diesem Modul nicht dargestellt. Für einen relativen Vergleich ist diese Form der Ergebnisse jedoch aussagekräftig.

Bewertet werden in diesem Zusammenhang die durch die Massnahmen im Folgeintervall quantifizierbaren Verbesserungen (Abbildung 31). Sind diese gering, wie etwa bei der ersten Deckschichtmassnahme nach 15 Jahren, ist auch das daraus resultierende Einsparungspotenzial entsprechend gering. Eine raschere Verschlechterung der Längsebenheit im Vergleich zur *Nichts-Tun-Funktion* (gewählt auf Basis der Längsebenheitsentwicklung) des vorangegangenen Erhaltungsintervalls kann zudem zu einer weiteren Reduktion der Einsparung führen.

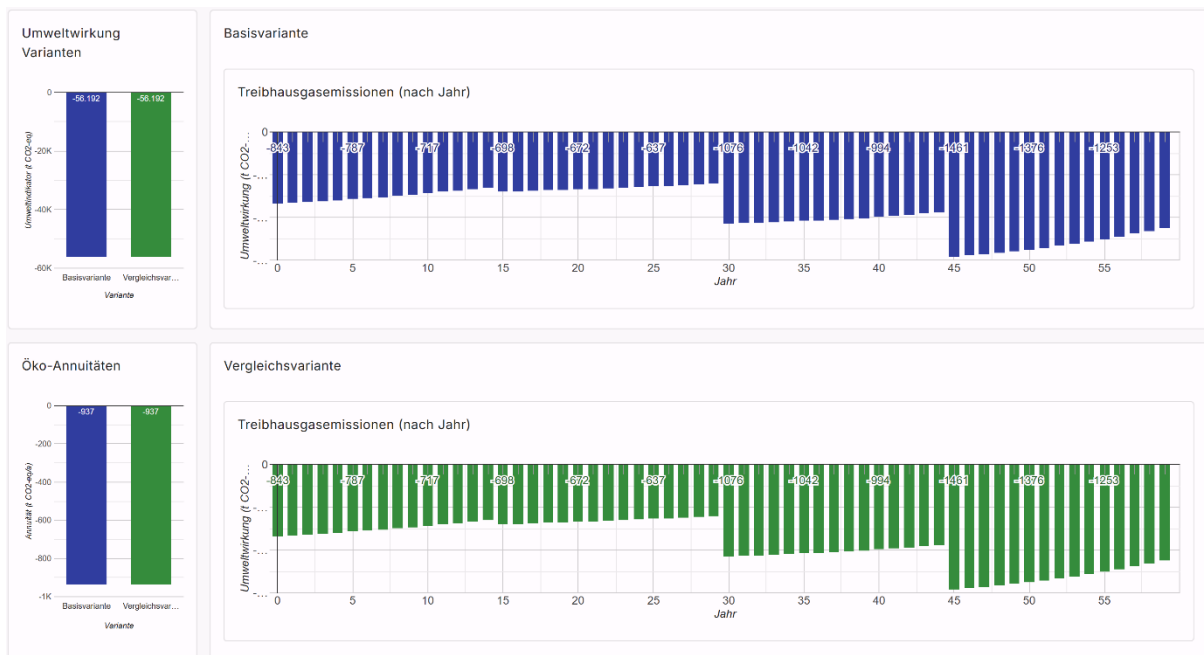


Abbildung 31: Ökologische Bewertung der Langzeitwirkungen (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)

Da die Eingangsparameter, welche Auswirkungen auf die ökologischen Langzeitwirkungen haben (Zuwachsrate E-PKW, Längsebenheit etc.), in der Basis- und der Vergleichsvariante als identisch angenommen wurden, ergibt sich im vorliegenden Beispiel keine Differenz zwischen den betrachteten Varianten.

Ein Einflussfaktor auf die ökologischen Langzeitwirkungen beider Varianten ergibt sich auch aus der Entwicklung des Anteils der beiden Fahrzeugkategorien PKW und E-PKW. Da angenommen wird, dass der Anteil der E-PKW im Zeitverlauf zunimmt, liefert diese Fahrzeugkategorie gegen Ende der Analyseperiode auch die grössten Einsparungen (Abbildung 32). Gut ersichtlich ist dies anhand der grossen Einsparungen durch die zweite Deckschichtmassnahme nach 45 Jahren im Vergleich zur ersten Deckschichtmassnahme nach 15 Jahren.

Anhand der Ergebnisse kann das grösste Einsparungs- und Optimierungspotenzial bei den Langzeitwirkungen mit der Qualität der Ausführung, im speziellen mit der Längsebenheit der Strasse verknüpft werden. Wird eine gute Ebenheit durch eine Massnahme erzielt, ergibt sich ein geringerer Energie- und Treibstoffverbrauch und somit geringere Treibhausgasemissionen im anschliessendem Erhaltungsintervall im Vergleich zum Fall des *Nichts-Tuns*, sofern nicht die Ebenheit rasch wieder schlechter wird.

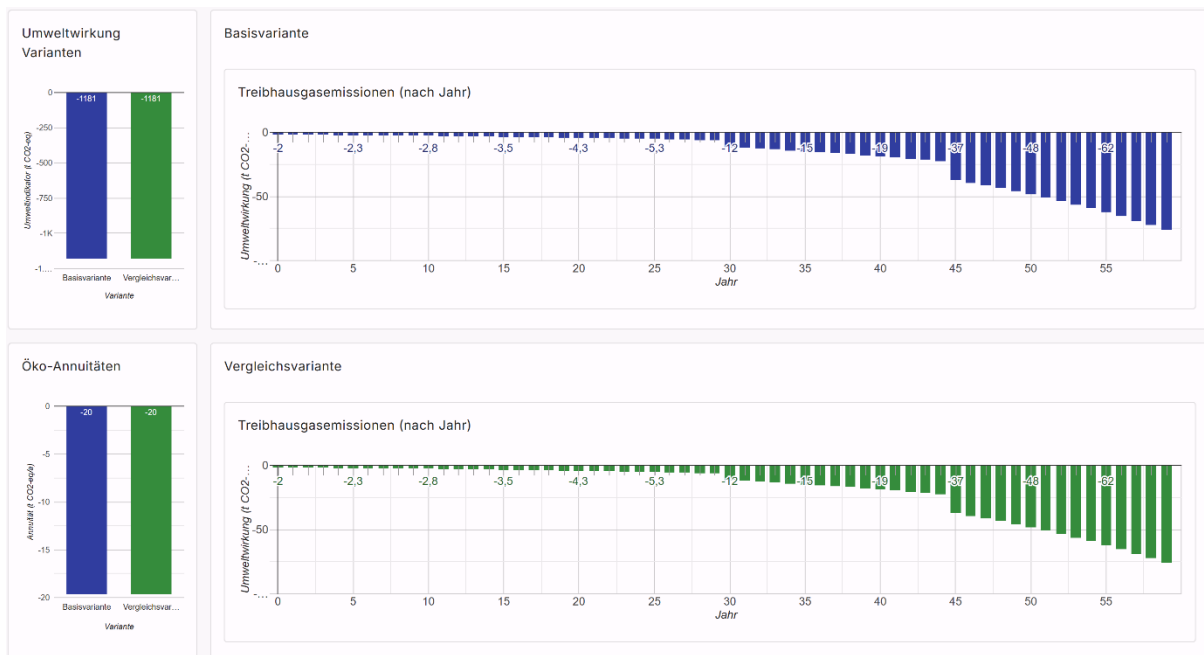


Abbildung 32: Ökologische Bewertung der Langzeitwirkungen (Fahrzeugkategorie E-PKW), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)

8.4 Vergleich Oberbauweisen mit gleicher technischer Nutzungsdauer

8.4.1 Eingangsdaten Oberbauvarianten

Für das Beispiel des Vergleichs von unterschiedlichen Oberbauweisen mit gleicher technischer Gesamtnutzungsdauer wurden die nationalen Vorgaben aus Österreich herangezogen. Das Querprofil des untersuchten Autobahnabschnitts in Österreich entspricht daher dem Regelquerschnitt für eine 4+0-Verkehrsführung gemäss den RVS 03.03.31 [97]. Die Fahrstreifen sind je 3.75 m breit, der äussere befestigte Seitenstreifen (Pannestreifen/Abstellstreifen, verbreitert) weist eine Breite von 3.50 m auf und der innere befestigte Seitenstreifen (Randstreifen, verbreitert) eine Breite von 1.50 m (Abbildung 33). Die Richtungsfahrbahnen sind durch einen 2.50 m breiten Mittelstreifen getrennt. Die gesamte Richtungsfahrbahn weist damit eine Breite von 12.50 m auf, die Breite der Strassenkrone beträgt 30.00 m.

Als Verkehrsbelastung wurde ein Gesamtverkehr von 30'000 KFZ/24h mit einem Schwerverkehrsanteil von 10 % gewählt. Die Verkehrsbelastung erreicht gegen Ende des Lebenszyklus die Kapazitätsgrenze des Querschnitts, was bedeutet, dass auch die Wirkungen durch zusätzlichen Stau infolge von Baumassnahmen bei diesen Berechnungsvarianten modelliert und beurteilt werden können.

Im Vorfeld wurde eine Oberbaudimensionierung gemäss den RVS 03.08.63 [18] (Gl. 76) für eine Standardbemessungsperiode von 30 Jahren durchgeführt, um die Lastklassen der Berechnungsvarianten 5 und 6 zu ermitteln. Der Bemessung liegt ein jährlich durchschnittlich täglicher Lastverkehr $DTV^{(SV)}$ (= JDTLV) von 3'000 LKW/24h zugrunde und 4'800 durchschnittlich tägliche Normlastwechsel $NLW_{\text{tägl}}$. Der mittlere Äquivalenzwert der Strassenkategorie $\bar{A}_{JDTLV}$ gemäss Tabelle 2 nach den RVS 03.08.63 [18] hat entsprechend der Strassenkategorie *Bundesstrassen A und S* den Wert 1.60. Der Richtungsfaktor für die Aufteilung des Lastverkehrs auf die Fahrtrichtungen R sowie der Faktor zur Berücksichtigung der Verteilung des Lastverkehrs auf mehrere Richtungsfahrstreifen V wird mit 1.0 angenommen, da die Verkehrsbelastung richtungsbezogen ist und zwei Fahrstreifen in jede Richtung zur Verfügung stehen.

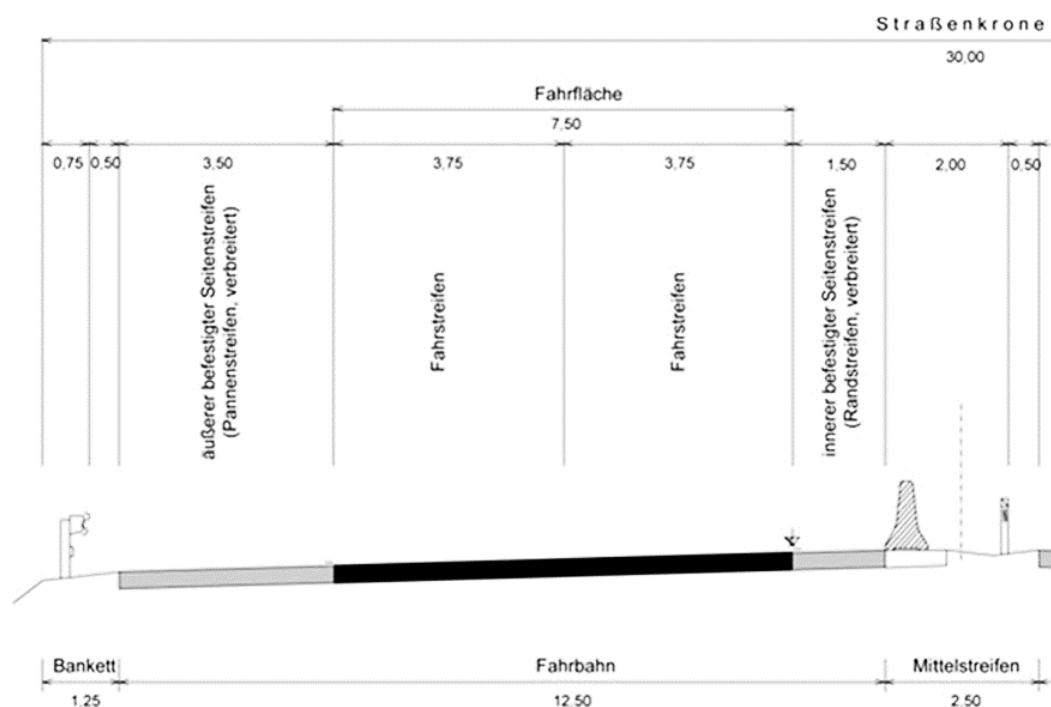


Abbildung 33: RVS 03.03.31: Querschnitt einer Strasse mit zweistreifigen Richtungsfahrbahnen für eine Verkehrsführung 4+0, Bsp. Österreich

Gemäss den Werten der Tabelle 3 nach den RVS 03.08.63 [18] beträgt der Faktor zur Berücksichtigung der Fahrspurverteilung in Abhängigkeit von der Fahrstreifenbreite 0.75. Der Zuwachsfaktor z für eine nach den RVS 03.08.63 [18] vorgeschlagene Zuwachsrate von 2 % für Autobahnen und Schnellstrassen entspricht dem Wert 1.35. Daraus ergibt sich für das geometrische Zuwachsmo-
del im SABINA-Bilanzrechner eine Zuwachsrate von 1.0 %.

$$BNLW = NLW_{\text{tägl}} \cdot R \cdot V \cdot S \cdot 365 \cdot n \cdot z$$

Gl. 76

mit

$NLW_{\text{tägl}}$ durchschnittlich tägliche Normlastwechsel (Übergänge der Normachslast von 100 kN) für den gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt der Verkehrsübergabe.

R Richtungsfaktor für die Aufteilung des Lastverkehrs auf die Fahrrichtungen

V Faktor zur Berücksichtigung der Verteilung des Lastverkehrs auf mehrere Richtungsfahstreifen

S Faktor zur Berücksichtigung der Fahrspurverteilung innerhalb des Fahstreifens gemäss den Werten der Tabelle 3 nach RVS 03.08.63

n Bemessungsperiode in Jahren

z Zuwachsfaktor unter Berücksichtigung einer jährlichen Zuwachsrate p (%) (Tabelle 4 nach RVS 03.08.63)

Die Bemessungsnormlastwechsel ergeben sich zu 53.22 Millionen, somit entspricht die zu untersuchende Berechnungsvariante AT-1 in Asphaltbauweise der Lastklasse LK82, Bautyp AS2 und die Berechnungsvariante AT-2 in Betonbauweise entspricht LK89, Bautyp BE1 gemäss den Empfehlungen der ASFINAG (siehe Planungshandbuch Bau ASFINAG [98]).

Lastklasse	LK163	LK82	LK42	LK25 ⁵⁾	LK10 ⁵⁾	LK4	LK1,3	LK0,4	LK0,1	LK0,05
BNLW in Mio.	> 82 bis 163 ¹⁾	> 42 bis 82	> 25 bis 42	> 10 bis 25	> 4 bis 10	> 1,3 bis 4	> 0,4 bis 1,3	> 0,1 bis 0,4	> 0,05 bis 0,1	≤ 0,05 ²⁾
Bautyp AS1	cm ± 81 31 20 30 K5	cm ± 79 29 20 30 K5	cm ± 77 27 20 30 K5	cm ± 75 25 20 30 K5	cm ± 73 23 20 30 K5	cm ± 70 20 20 30 K5	cm ± 66 16 20 30 K5	cm ± 63 13 20 30 K5	cm ± 60 10 20 30 K5	cm ± 58 8 20 30 K5
Bautyp AS2 ³⁾	cm ± 79 29 20 30 K5	cm ± 77 27 20 30 K5	cm ± 75 25 20 30 K5	cm ± 71 23 18 30 K5	cm ± 69 21 18 30 K5	cm ± 66 18 18 30 K5	cm ± 62 14 18 30 K5	cm ± 59 11 18 30 K5	cm ± 56 8 18 30 K5	cm ± 54 6 18 30 K5
Bautyp AS3							cm ± 66 16 10 40 K5	cm ± 63 13 10 40 K5	cm ± 60 10 10 40 K5	cm ± 57 7 10 40 K5
Bautyp AS4	cm ± 72 22 30 K5	cm ± 70 20 30 K5	cm ± 69 19 30 K5	cm ± 67 17 30 K5	cm ± 65 15 25 20 K5	cm ± 60 15 25 20 K5	cm ± 55 10 25 20 K5	cm ± 50 5 20 20 K5	cm ± 45 5 20 20 K5	cm ± 43 5 18 20 K5
Bautyp AS5 ⁴⁾				cm ± 75 5 20 30 K5	cm ± 73 5 20 30 K5	cm ± 70 5 20 30 K5	cm ± 66 5 20 30 K5		cm ± 63 5 20 30 K5	

- 1) Für höhere Belastungen ist eine gesonderte rechnerische Dimensionierung gemäß RVS 03.08.68 erforderlich.
2) Die Dickenfestlegungen für das Asphaltpaket gelten nur, wenn auf der ungeb. Oberen Tragschicht der Klasse U1 gemäß RVS 08.15.01 der höhere Abnahmewert $E_{T1} \geq 120 \text{ MN/m}^2$ erreicht wird. Ansonsten sind die entsprechenden Dickenwerte der Bautyp AS1 maßgebend.
3) Bei geringeren Belastungen kann eine Dimensionierung gemäß RVS 03.03.81 erfolgen.
4) Für Belastungen über 25 Mio. BNLW ist eine gesonderte rechnerische Dimensionierung gemäß RVS 03.08.68 erforderlich.
5) Sind sämtliche bituminöse Tragschichten mit polymermodifiziertem Bindemittel gemäß ONORM EN 14023 hergestellt, kann die obere Lastklassengrenze um 10% erhöht werden.

Abbildung 34: Bauweisen mit Asphaltdecke der Lastklasse LK82, AS2 gemäss den RVS 03.08.63 [18], Bsp. Österreich

Lastklasse ¹⁾	LK185	LK89	LK40	LK21	LK18	LK6,5	LK2,1	LK0,6	LK0,15	LK0,075
BNLW in Mio.	> 89 bis 185 ²⁾	> 40 bis 89	> 18 bis 40	> 18 bis 21	> 6,5 bis 18	> 2,1 bis 6,5	> 0,6 bis 2,1	> 0,15 bis 0,6	> 0,075 bis 0,15	≤ 0,075 ³⁾
Bautyp BE1	Betondecke verdübelt									
	cm Σ 79 29 5 45 UP	cm Σ 77 27 5 45 UP	cm Σ 75 25 5 45 UP	cm Σ 73 23 5 45 UP	cm Σ 72 22 5 45 UP	cm Σ 70 20 5 45 UP	cm Σ 55 20 5 30 UP	cm Σ 50 20 30 UP	cm Σ 48 18 20 UP	cm Σ 36 16 20 UP
Bautyp BE2	Betondecke verdübelt									
	cm Σ 74 29 5 20 20 UP	cm Σ 72 27 5 20 20 UP	cm Σ 70 25 5 20 20 UP	cm Σ 69 23 5 20 20 UP	cm Σ 68 22 5 20 20 UP	cm Σ 65 20 5 20 20 UP	cm Σ 61 18 5 18 20 UP	cm Σ 56 18 18 20 UP	cm Σ 54 16 18 20 UP	cm Σ 54 16 18 20 UP
Die Querriegelung des Unterbauplanums ist gleich der Fahrbahn auszuführen. $E_{v1,UP} \geq 35 \text{ MN/m}^2$										

Anmerkungen (bezüglich der Festlegung der Plattengeometrie s. auch RVS 08.17.02):

- Bei ständigem randnahen Verkehr (Radspurmitte näher als 30 cm zum Betondeckenrand), häufigen Überfahrten des freien Betondeckenrandes bzw. häufigen Einbauten ist die Betondeckendicke der nächsthöheren Lastklasse zu wählen.
- Für Belastungen über 185 Mio. BNLW ist eine gesonderte Dimensionierung erforderlich.
- Bei geringen Belastungen kann eine Dimensionierung gemäß RVS 03.03.81 erfolgen.

	Betondecke gemäß RVS 08.17.02		U6,U7 ungebundene Untere Tragschicht Klassen U6 oder U7 gemäß RVS 08.15.01
	bituminöse Tragschicht gemäß RVS 08.16.01		U8 ungebundene Untere Tragschicht Klasse U8 gemäß RVS 08.15.01
	hydraulisch stabilisierte Tragschicht (ST-Z, ST-T) gemäß RVS 08.17.01		

Abbildung 35: Bauweisen mit Betondecke der Lastklasse LK89, BE1 gemäss den RVS 03.08.63 [18], Bsp. Österreich

8.4.1.1 Berechnungsvariante AT-1 (Asphaltbauweise)

Die bauliche Ausgestaltung mit den zweckmässigen Asphaltmischgutsorten werden in Abhängigkeit von der Verkehrsbeanspruchung und der Oberbaudimensionierung gemäss der zuvor durchgeführten Oberbaubemessung nach den RVS 03.08.63 [18] und den Empfehlungen im Planungshandbuch Bau der ASFINAG [98] gewählt. Die zu untersuchende Berechnungsvariante AT-1 in Asphaltbauweise entspricht der Lastklasse LK82, Bautyp AS2.

Tabelle 31: Schichtaufbau der Berechnungsvariante AT-1, Bsp. Österreich

Schicht	Bezeichnung	Schichtdicke [mm]	Recyclinganteil [%]
Asphaltdeckschicht	SMA 11 deck PmB, S2, GS	30	0
Asphaltbinderschicht	AC 22 bin PmB, H1, G4	80	30
Asphalttragschicht	AC 22 bin PmB, H1, G4	160	30
Ungeb. obere Tragschicht (Klasse U1 gem. RVS 08.15.01)	Bestand	-	-
Foundations-/ Frostschutzschicht	Bestand	-	-

Die Berechnungsvariante AT-1 mit SMA 11 deck PmB 45/80-80, S2, GS, KA20 als Asphaltdeckschicht wird in der üblichen Schichtdicke von 3.0 cm auf einer Asphaltbinderschicht AC 22 bin PmB 25/55-65, H1, G4, KA18 mit 8.0 cm Schichtdicke realisiert. Die Asphalttragschicht

besteht aus 16 cm AC 22 bin PmB 45/80-65, H1, G4. Die genannten Asphaltmischgutsorten werden üblicherweise für hohe Lastklassen vorgesehen. Die gesamte Schichtdicke der Tragschicht entspricht 16.0 cm. Somit ergibt sich eine Asphaltstärke von insgesamt 27.0 cm. Die ungebundenen Schichten werden nicht erneuert.

Für die Erneuerung des Autobahnabschnitts werden ausschliesslich dieselbetriebene Baumaschinen und Lastkraftwagen verwendet. Dies entspricht dem derzeit am weitesten verbreiteten Antriebssystem. Die Asphaltmischgüter für den Bau des Autobahnabschnitts werden aus einer Asphaltmischanlage geliefert, welche in einer Entfernung von 25 km zur Baustelle liegt. Zur Produktion der Asphaltmischgüter wird Ökostrom AT verwendet und die Wärme zur Asphaltproduktion wird aus Erdgas bereitgestellt. Zwischen den jeweiligen Asphaltschichten wird zur Sicherstellung des Schichtverbundes eine bituminöse Haftschrift mit einem Flächengewicht von 0.2 kg/m² eingebaut.

Zur Modellierung des Lebenszyklus wurde ein Standardlebenszyklus für einen Asphaltoberbau mit konventioneller Deckschicht gemäss TAniA [1] herangezogen. Anhand der angenommenen Nutzungsdauern ergibt sich für Berechnungsvariante AT-1 der in Abbildung 36 dargestellte Lebenszyklus.

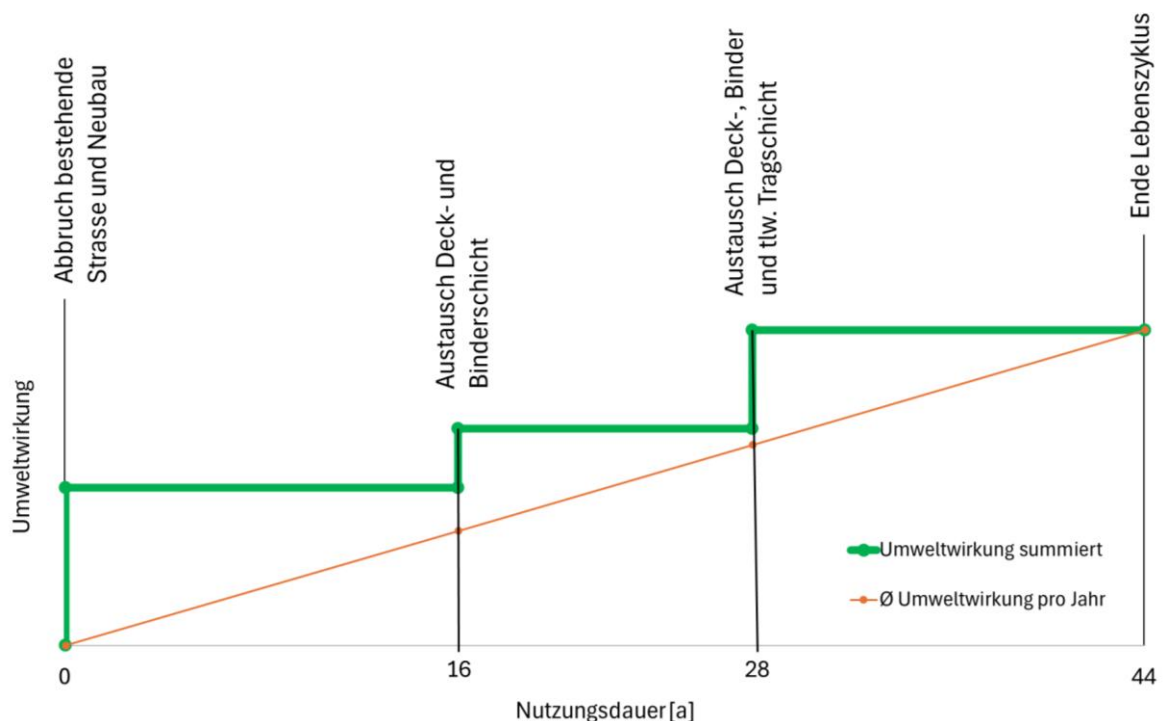


Abbildung 36: Lebenszyklus der Berechnungsvariante AT-1, Bsp. Österreich

Zu Beginn der Lebenszyklusbetrachtung wird eine bestehende Strasse mittels dieselbetriebener Baumaschinen vollständig zurückgebaut. Der Rückbau erfolgt durch Abfräsen des Strassenoberbaus bzw. durch Abbruch mittels eines Hydraulikbaggers. Es wird angenommen, dass dieser Aufbau identisch zum Neubau (Erneuerung) ist. Der rückgebaute Asphalt wird zu 100 % stofflich rezykliert. Die Aufbereitungsanlage (Asphaltemischanlage) liegt in einer Entfernung von 25 km zur Baustelle. Nach dem vollständigen Rückbau der Strasse erfolgt ein Neubau gemäss Tabelle 31.

Nach einer Zeitspanne von 16 Jahren wird eine erste Erhaltungsmassnahme der Deck- und Binderschicht durchgeführt. Der Abbruch der Deck- und Binderschicht erfolgt mittels Fräsen. Bei dieser Erhaltungsmassnahme werden Lastkraftwagen mit der Antriebsart Plugin-Hybrid-Diesel eingesetzt. Die weiteren Baumaschinen werden batterieelektrisch betrieben.

Nach weiteren 12 Jahren, also 28 Jahre nach der Erneuerung, erfolgt eine Verstärkungsmassnahme der Deck- und Binderschicht sowie eines Teils der gebundenen Tragschichten. Der Rückbau erfolgt erneut mittels Fräsen. Dabei kommen Lastkraftwagen mit der Antriebsart *Brennstoffzelle elektrisch* sowie batterieelektrische Baumaschinen zum Einsatz.

Rund 44 Jahre nach der vollständigen Erneuerung hat der Strassenaufbau das Ende seiner technischen Nutzungsdauer (Lebenszyklus) erreicht und der Betrachtungszeitraum endet. Ein Rückbau des gesamten Strassenaufbaus wird nicht betrachtet, da dieser bereits zu Beginn der Lebenszyklusbetrachtung im Zuge der Erneuerung bilanziert wurde.

Dieses Szenario widerspiegelt die Realität, da in den meisten Fällen bereits ein bestehender Strassenaufbau vorliegt, welcher ausgetauscht wird.

Für alle beschriebenen Massnahmen erfolgt eine Zustandsprognose der Längsebenheit mithilfe von IRI-Werten vor und nach der Massnahme, und es werden die Änderungsraten vor und nach der Massnahme definiert. Die angesetzten Verbesserungen (Wirkungen) sowie die Änderungsraten wurden für die Variante AT-1 in Anlehnung an das im österreichischen PMS-Handbuch [44] beschriebene quasi-lineare Zustandsprognosemodell gewählt, mit einem Startwert zwischen 0.5 und 1.0 m/km sowie einer jährlichen Änderungsrate im Bereich von 0.08 bis 0.13 m/km. Die Werte der Berechnungsvariante AT-1 können der Tabelle 32 entnommen werden.

Tabelle 32: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante AT-1, Bsp. Österreich

Variante AT-1 – Asphalt	IRI [m/km]		
	M1	M2	M3
Längsebenheit vor der Massnahme	2.4	2.4	2.4
Änderungsrate Längsebenheit vor der Massnahme	0.08	0.1	0.1
Längsebenheit nach der Massnahme	0.8	1.2	1.0
Änderungsrate Längsebenheit nach der Massnahme	0.1	0.1	0.1

Als Eingangsgrössen für die ökonomische Bewertung der Lebenszykluskosten müssen die Kosten der Massnahmen angegeben werden. Die Kosten für Berechnungsvariante AT-1 sind in Tabelle 33 dargestellt und wurden auf Basis der publizierten Kennzahlen in TAniA [1] gewählt. Die Valorisierung wird gemäss den Informationen der ASFINAG mit 1.65 % angenommen und der Diskontierungszinssatz beträgt 3.125 %.

Tabelle 33: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante AT-1, Bsp. Österreich

Variante AT-1 – Asphalt	Jahr	Kosten [€]
M1 – Neubau	0	25'000'000
M2 – Asphaltdeck- und -binderschicht	16	5'000'000
M3 – Asphaltdeck-, -binder- und -tragschicht	28	7'500'000

8.4.1.2 Berechnungsvariante AT-2 (Betonbauweise)

Der Aufbau der Betonbauweise wird in Abhängigkeit von der Verkehrsbeanspruchung entsprechend den RVS 03.08.63 [18] und den Empfehlungen nach dem Planungshandbuch Bau der ASFINAG [98] festgelegt. Die zu untersuchende Berechnungsvariante in Betonbauweise entspricht der Belastungsklasse LK89, Bautyp BE1. Die Betondecke wird in Oberbeton mit einer Schichtdicke von 4 cm und Unterbeton mit einer Schichtdicke von 23 cm unterteilt. Die Oberfläche der Betonfahrbahndecke wird in Waschbetonbauweise ausgeführt. Darunter befindet sich eine 5 cm dicke *bituminöse Tragschicht*. Der Gesamtaufbau weist eine Dicke von 77 cm auf. Die Schichtdicken sind in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34: Schichtaufbau der Berechnungsvariante AT-2, Bsp. Österreich

Schicht	Bezeichnung	Schichtdicke [mm]	Zementsorte
Oberbeton	OB GK 8 (Waschbeton)	40	CEM II/A-S (DZ)
Unterbeton	UB 0/32	230	CEM II/A-S (DZ)
Bit. Tragschicht	AC 16 trag, T3, G4	50	-
Ungeb. untere Tragschicht	Bestand	-	-
Foundations-/ Frostschutzschicht	Bestand	-	-

Die Betondecke wird gemäss den standardisierten Vorgaben in Plattenbauweise errichtet, wobei die Platten mit Stahldübeln im Bereich der Quertugen und mit Ankern im Bereich der Längstugen verbunden werden. Der geschätzte Armierungsgehalt liegt bei 11 kg/m³. Zur Vermeidung von wilden Schwindrissen werden die Betonplatten mittels Scheinfugen rasterförmig unterteilt und die Fugen mit einer bitumenhaltigen Fugenmasse mit einem Flächengewicht von 0.20 kg/m² verschlossen. Der Abstand der Quertugen beträgt 5.00 m. Die ungebundenen Schichten werden nicht erneuert.

Für die Erneuerung des Autobahnabschnitts werden ausschliesslich dieselbetriebene Baumaschinen und Lastkraftwagen verwendet. Die hydraulisch gebundenen Mischgüter für den Bau des Autobahnabschnitts werden aus einem mobilen Betonwerk geliefert, das im Mittel ca. 5 km von der Einbaustelle entfernt ist. Zur Produktion des Betons wird Ökostrom AT verwendet. Die Asphaltmischgüter sowie das Material der Frostschutzschicht werden aus einer 25 km entfernten Asphaltmischanlage geliefert.

Zur Modellierung des Lebenszyklus wurde ein Standardlebenszyklus für einen Betonoberbau mit konventioneller Deckschicht gemäss TAniA [1] herangezogen und adaptiert. Der Standardlebenszyklus geht von einer umfangreichen Betonplattensanierung bzw. -auswechslung von ca. 5 % der Platten im Jahr 32 aus. Im diesem Beispiel wurde zusätzliche eine zweite Massnahme (0,5 % Betonplattensanierungen und -auswechslung) im Jahr 15 vorgesehen. Aus den angenommenen Nutzungsdauern ergibt sich für die Berechnungsvariante AT-2 der Lebenszyklus in Abbildung 37.

Tabelle 35: Nutzungsdauern unterschiedlicher Strassenschichten in der Betonbauweise, Beispiel Österreich

Schicht	Theoretische Nutzungsdauer [a] gemäss [1]	Angenommene Nutzungsdauer [a]
Betondecke (Über- und Unterbeton)	44 (nach 32 Jahren 5 % Betonplattenauswechslungen)	44 (nach 15 Jahren 0.5 % Betonplatteninstandsetzungen, nach 32 Jahren 5 % Betonplattensetzungen mit einer gleichzeitigen Überbauung der Betondecke durch eine Asphaltdeckschicht)
Bit. Tragschicht	44	44
Foundations-/ Frostschutzschicht	44	44

Die Lebenszyklusbetrachtung von Berechnungsvariante AT-2 beginnt mit dem Rückbau eines bestehenden Oberbaus in Betonbauweise. Es wird angenommen, dass dieser identisch mit dem Neubau (Erneuerung) ist, welcher anschliessend errichtet wird. Der Neubau wird ausschliesslich mit dieselbetriebenen Lastkraftwagen und Baumaschinen realisiert.

Rund 15 Jahre nach dem Neubau finden erste Instandsetzungsarbeiten an den Betonplatten statt. Dabei wird angenommen, dass die Instandsetzungsarbeiten dem Austausch von 0.5 % der Betonplatten entsprechen. Die Oberfläche wird im schadhaften Bereich aufgebrochen und das Material mit Plugin-Hybrid-Diesel betriebenen Lastkraftwagen zur Aufbereitungsanlage transportiert. Die weiteren Baumaschinen werden batterieelektrisch betrieben.

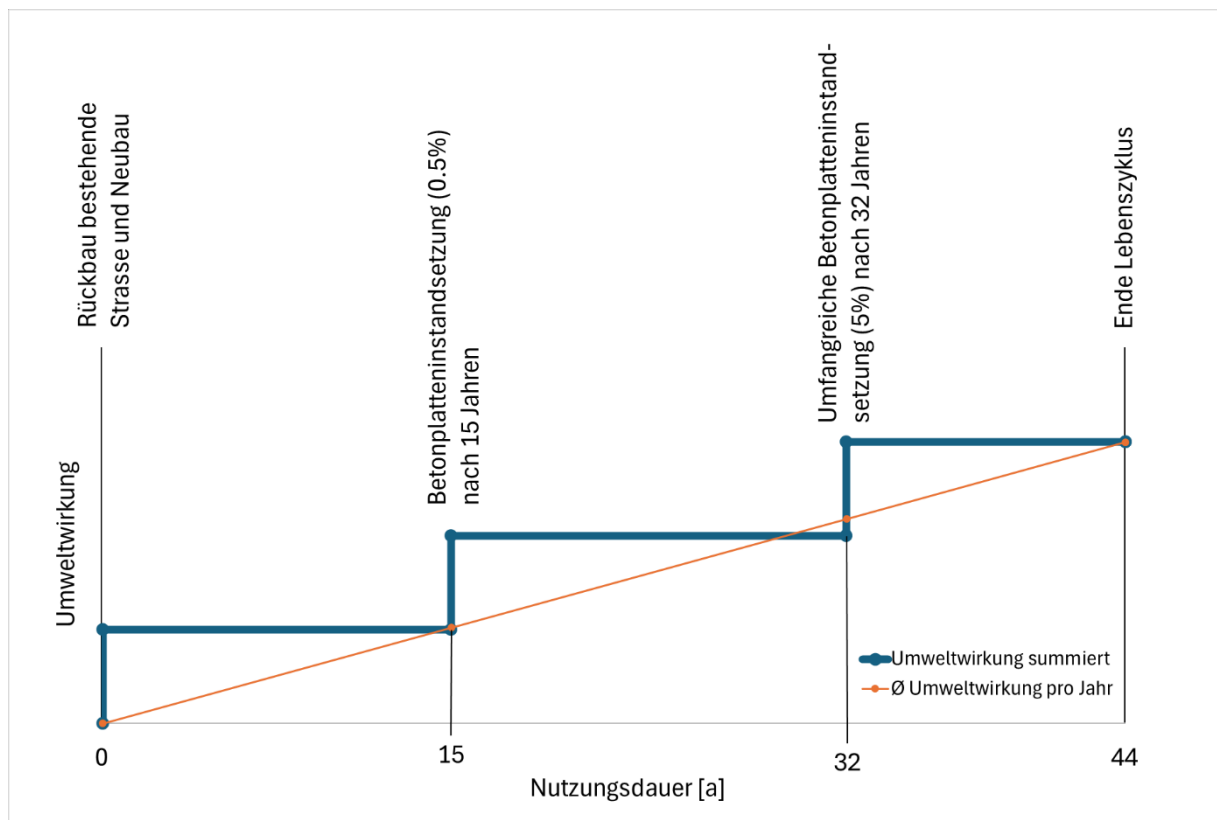


Abbildung 37: Lebenszyklus der Berechnungsvariante AT-2, Bsp. Österreich

32 Jahre nach der Erneuerung, bzw. 17 Jahre nach den letzten Instandsetzungsarbeiten, finden erneute Instandsetzungsarbeiten an den Betonplatten statt. Dieses Mal wird angenommen, dass diese Instandsetzungsarbeiten einem Austausch von rund 5 % der Betonplatten entsprechen und zusätzlich eine 3 cm dicke Asphaltdeckschicht (SMA 11, S2, G1/GS) aufgebracht wird (vgl. Tabelle 35, in Abbildung 37 nicht gesondert dargestellt). Sämtliche Baumasnahmen erfolgen mittels batterieelektrischer Baumaschinen und Plugin-Hybrid-Diesel-betriebener Lastkraftwagen. Der Abbruch der einzelnen geschädigten Betonplatten geschieht durch Aufbrechen der Platten, die zu 100 % stofflich recycelt werden. Die Aufbereitungsanlage des Betons liegt in einer Entfernung von 5 km, während die Entfernung der Aufbereitungsanlage (Asphaltemischanlage) des Asphalts 25 km zur Baustelle beträgt.

Für alle beschriebenen Massnahmen wird die Zustandsprognose der Längsebenheit auf Basis von IRI-Werten vor und nach der Massnahme sowie der jeweiligen Änderungsraten vor und nach der Massnahme definiert, unter Heranziehung der (bereits mehrfach erwähnten) Empfehlungen des österreichischen PMS-Handbuchs [44]. Die Werte der Berechnungsvariante AT-2 können der Tabelle 36 entnommen werden.

Tabelle 36: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante AT-2, Bsp. Österreich

Szenario AT-2 – Beton	IRI [m/km]		
	M1	M2	M3
Längsebenheit vor der Massnahme	2.4	2.1	3.36
Änderungsrate Längsebenheit vor der Massnahme	0.08	0.08	0.08
Längsebenheit nach der Massnahme	0.9	2.0	0.8
Änderungsrate Längsebenheit nach der Massnahme	0.08	0.08	0.08

Als Eingangsgrössen für die ökonomische Bewertung der Lebenszykluskosten müssen die Kosten der Massnahmen angegeben werden. Die Kosten für Berechnungsvariante 6 sind in Tabelle 37 dargestellt und wurden auf Basis der publizierten Kennzahlen in TAniA [1] gewählt. Die Valorisierung wird analog zur Variante AT-1 mit 1.65 % angenommen und der Diskontierungszinssatz beträgt 3.125 %.

Tabelle 37: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante AT-2, Bsp. Österreich

Variante AT-2 – Beton	Jahr	Kosten [€]
M1 – Neubau	0	27'500'000
M2 – Asphaltdeck- und -binderschicht	15	1'250'000
M3 – Asphaltdeck-, -binder- und -tragschicht	32	5'000'000

8.4.2 Ergebnisse

Ziel der Beispielberechnung für Österreich ist der direkte Vergleich zweier unterschiedlicher Bauweisen (Asphalt und Beton) mit gleicher technischer Nutzungsdauer. Dadurch können beide Varianten innerhalb eines Projekts gegenübergestellt werden, um eine schnelle und fundierte Entscheidungsgrundlage in einem Planungsprozess zu erhalten.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass beim vorliegenden Vergleich zweier unterschiedlicher Bauweisen nicht die jeweiligen Vor- und Nachteile aufgelistet werden sollen. Vielmehr wird dargestellt, welche unterschiedlichen Ergebnisse mit dem SABINA-Bilanzrechner ermittelt werden können und an welchen Stellen die Anwenderin diese Unterschiede erkennen und bewerten kann, um daraus Entscheidungen abzuleiten.

Eine wesentliche Randbedingung dieser Beispielanalyse ist die identische gesamte technische Nutzungsdauer des Strassenoberbaus beider Oberbauvarianten, unter Berücksichtigung sämtlicher im Lebenszyklus erforderlicher Erhaltungsmassnahmen zur Erreichung dieses

Ziels. Auch wenn sich in der Praxis häufig zeigt, dass sich die technischen Nutzungsdauern von Asphalt- und Betonbauweisen unterscheiden können, wurden die Lebenszyklen in der vorliegenden Analyse so definiert, dass in beiden Fällen nach etwa 44 Jahren das Ende der jeweiligen technischen Nutzungsdauer erreicht wird (siehe hierzu auch Ergebnisse aus TAniA [1]). Diese Festlegung erfolgte auch vor dem Hintergrund, dass in Deutschland und in Österreich die Bemessungsperiode für starre und flexible Oberbauweisen bei hochbelasteten Straßen identisch ist und daher auch für diesen Planungsfall einheitlich angesetzt wurde. In diesem Beispiel entspricht die Basisvariante der Asphaltbauweise (Berechnungsvariante AT-1, siehe 8.4.1.1), während die Vergleichsvariante die Betonbauweise (Berechnungsvariante AT-2, siehe 8.4.1.2) abbildet. Welche Variante als Basis und welche als Vergleich definiert wird, liegt im Ermessen der Anwenderin.

In der derzeitigen Ausbaustufe des SABINA-Bilanzrechners ist es nicht vorgesehen, bei unterschiedlichen technischen Nutzungsdauern im Rahmen eines einzigen Projekts beide Varianten gleichzeitig abzubilden. Die technische Nutzungsdauer bzw. die Analyseperiode ist projektspezifisch definiert. Im Regelfall stellen die zu vergleichenden Varianten Unterschiede in den Materialien, Schichtdicken usw. dar, weisen jedoch keine abweichenden technischen Nutzungsdauern auf (siehe auch Beispiel Schweiz, Kapitel 8.3). Es besteht aber im SABINA-Bilanzrechner die Möglichkeit, zwei separate Projekte mit unterschiedlichen technischen Nutzungsdauern bzw. Analyseperioden anzulegen und miteinander zu vergleichen (siehe Beispiel Deutschland, Kapitel 8.5). Ein solcher Vergleich ist insbesondere in frühen Planungsphasen sinnvoll, um mögliche Lösungsansätze zu bewerten.

8.4.2.1 Ökonomische Bewertung der Massnahmen

Die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung sind in Abbildung 38 abgebildet. Die ökonomischen Detaillergebnisse (unterer Bereich in Abbildung 38) veranschaulichen, dass die über den Lebenszyklus anfallenden Kosten für die bauliche Erhaltung erheblich variieren. Dies ist auf die jeweils angesetzten Lebenszyklen sowie die eingegebenen Erhaltungsmassnahmen und Erhaltungsintervalle zurückzuführen. Zwar liegen die Anfangsinvestitionen bei der Betonbauweise (Vergleichsvariante, grüne Balken) etwas höher, jedoch führen die deutlich intensiveren Erhaltungsmassnahmen beim Asphalt (Basisvariante, blaue Balken) dazu, dass sich über die gesamte Analyseperiode von 44 Jahren (technische Nutzungsdauer) sehr ähnliche Kapitalwerte und Annuitäten ergeben. Die Unterschiede liegen dabei in einem Streubereich von weniger als 10 %, was auch innerhalb der in TAniA [1] angegebenen Streuungen der Einheitspreise liegt.

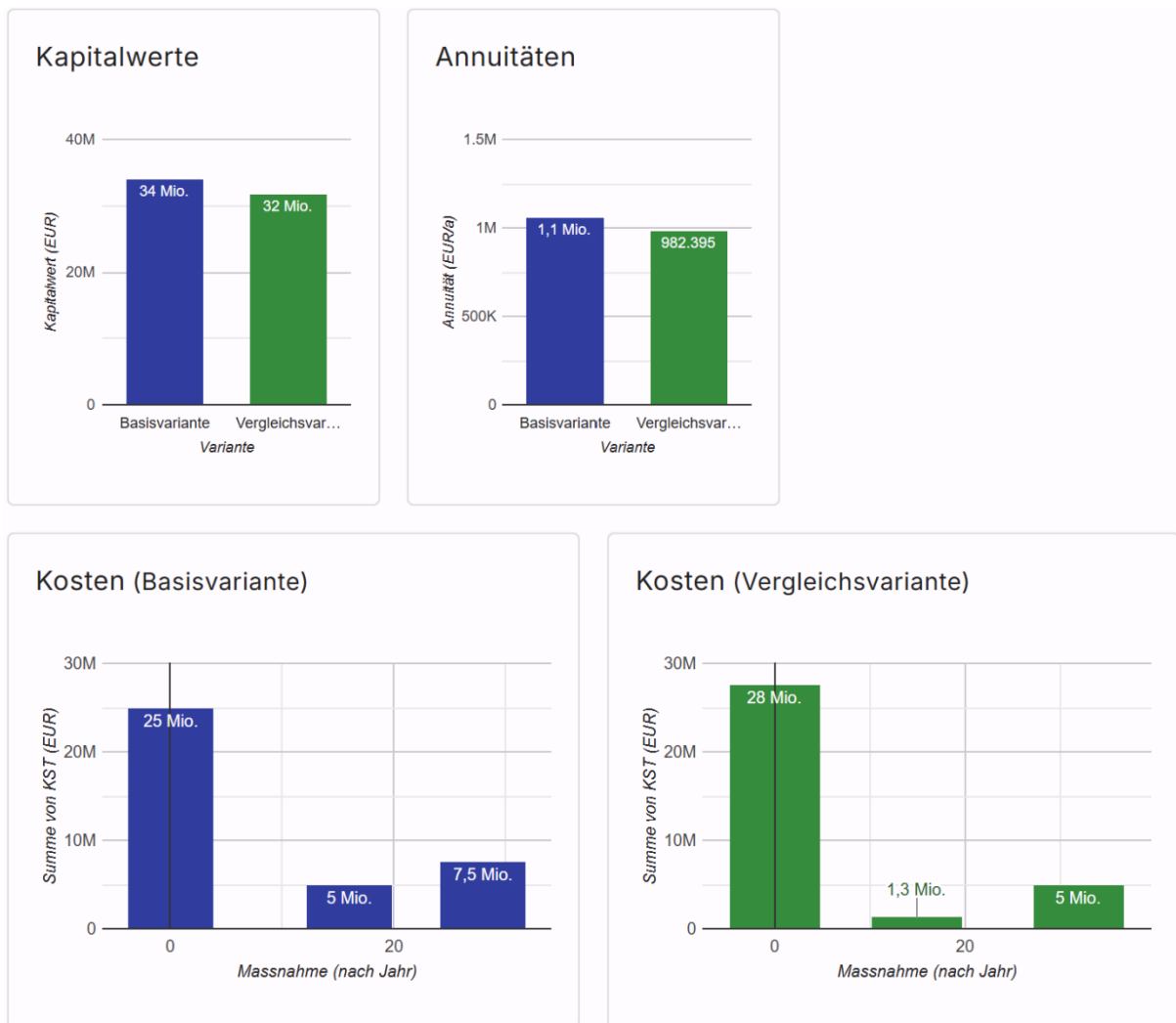


Abbildung 38: Ökonomische Bewertung, Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)

Der SABINA-Bilanzrechner verdeutlicht somit nachvollziehbar, dass beide Varianten bei den vorliegenden Eingabewerten nur geringe ökonomische Abweichungen aufweisen und daher aus ingenieurtechnischer Sicht mit den gewählten Kostenansätzen als *gleichwertig* einzustufen sind. Dieses Ergebnis entspricht auch den Erwartungen aus ökonomischer Sicht, wenn realistische Erfahrungswerte und standardisierte Oberbaukonstruktionen mit gleicher technischer Nutzungsdauer herangezogen werden.

Die entscheidende Einflussgrösse für eine Verbesserung der ökonomischen Bewertung liegt einerseits bei den geschätzten Massnahmenkosten und andererseits in der Wahl des Lebenszyklus mit den damit verbundenen Erhaltungsmassnahmen und -intervallen. Einsparungspotenziale ergeben sich insbesondere durch eine Verlängerung der Erhaltungsintervalle, sofern die am Ende dieser Intervalle durchzuführenden Massnahmen nicht intensiver ausfallen. Dies

ist in vielen Fällen nur dann realisierbar, wenn entweder Materialien höherer Qualität verwendet werden, die Bauausführung die Mindestanforderungen deutlich übertrifft oder der Oberbau eine höhere Belastbarkeit als rechnerisch erforderlich aufweist. Im Umkehrschluss führt dies jedoch häufig zu höheren Anfangsinvestitionen. Daher ist nicht der Kapitalwert, sondern die Annuität die entscheidende Bewertungsgrösse zur Quantifizierung von Optimierungs- und Einsparpotenzialen.

8.4.2.2 Ökologische Bewertung der Massnahmen

Als massgeblicher Indikator für die ökologische Bewertung im SABINA-Bilanzrechner wurde das in Österreich gebräuchliche *Global Warming Potential* (GWP) gewählt. Die Abbildung 39 zeigt die direkten Treibhausgasemissionen der Baumassnahmen entsprechend den jeweiligen Lebenszyklusphasen.

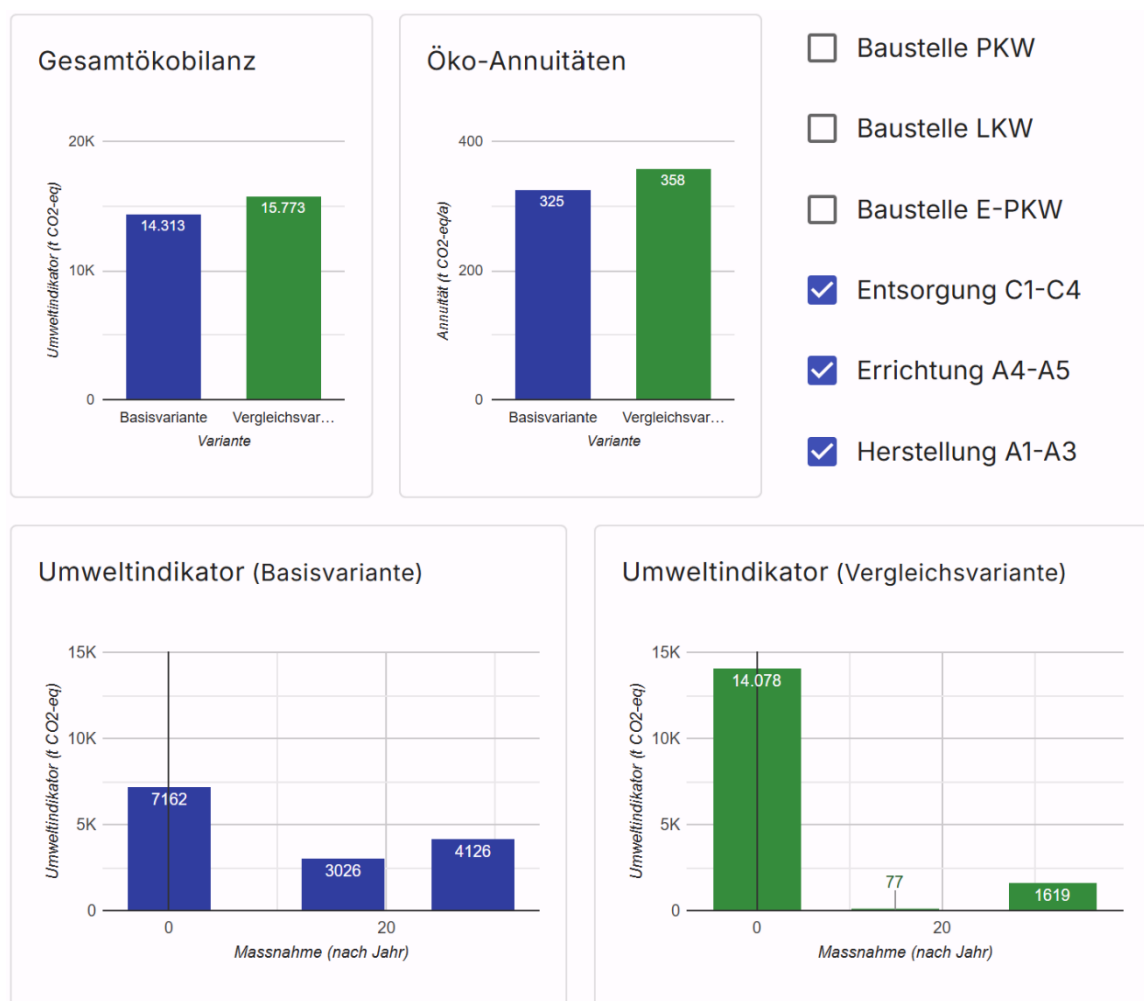


Abbildung 39: Ökologische Bewertung, Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)

Insgesamt lässt sich anhand der Gesamtökobilanz, verursacht durch die bauliche Umsetzung der Massnahmen, kein massgebender Vor- oder Nachteil für eine der beiden Varianten erkennen. Die Unterschiede liegen sowohl bei der Gesamtökobilanz als auch bei den Öko-Annuitäten in einem Streubereich von $\pm 10\%$ mit etwas geringeren Treibhausgasemissionen bei der Asphaltvariante (Basisvariante). Da die technischen Nutzungsdauern beider Varianten identisch sind, können sowohl der Gesamtwert als auch die Öko-Annuität für die Bewertung und den Vergleich in gleicher Weise herangezogen werden.

Ob signifikante Unterschiede in bestimmten Teilbewertungen bestehen, kann durch die getrennte Betrachtung der einzelnen Phasen (Herstellung, Errichtung und Entsorgung) analysiert werden.

Abbildung 40 zeigt den Vergleich im Bereich *Herstellung* (Module A1 bis A3). Wie zu erwarten, fallen die Auswirkungen bei der Betonbauweise höher aus, da die Treibhausgasemissionen des Bindemittels Zement auch in diesem Beispiel über jenen des im Asphalt verwendeten Bitumens liegen. Besonders die erste Erhaltungsmassnahme, die Erneuerung in Betonbauweise (unterer Bereich, grüner Balken), liefert hier den grössten Anteil im gesamten Lebenszyklus. Die Wirkungen der Deck- und Binderschichtmassnahme im Jahr 16 sowie die strukturelle Verbesserung des Asphaltoberbaus im Jahr 28 bei der Asphaltbauweise sind in Abbildung 40 erkennbar und erhöhen die Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus.

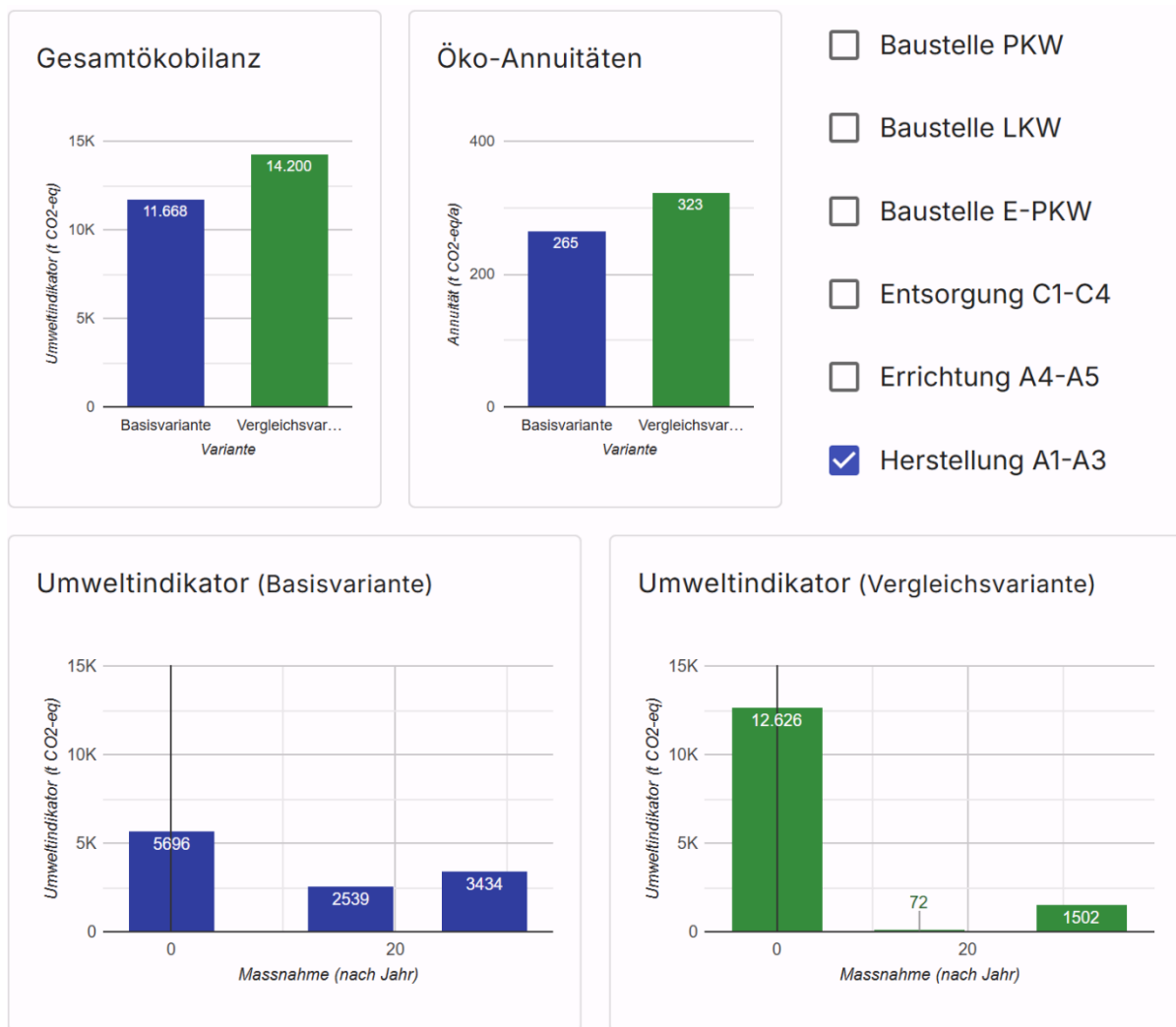
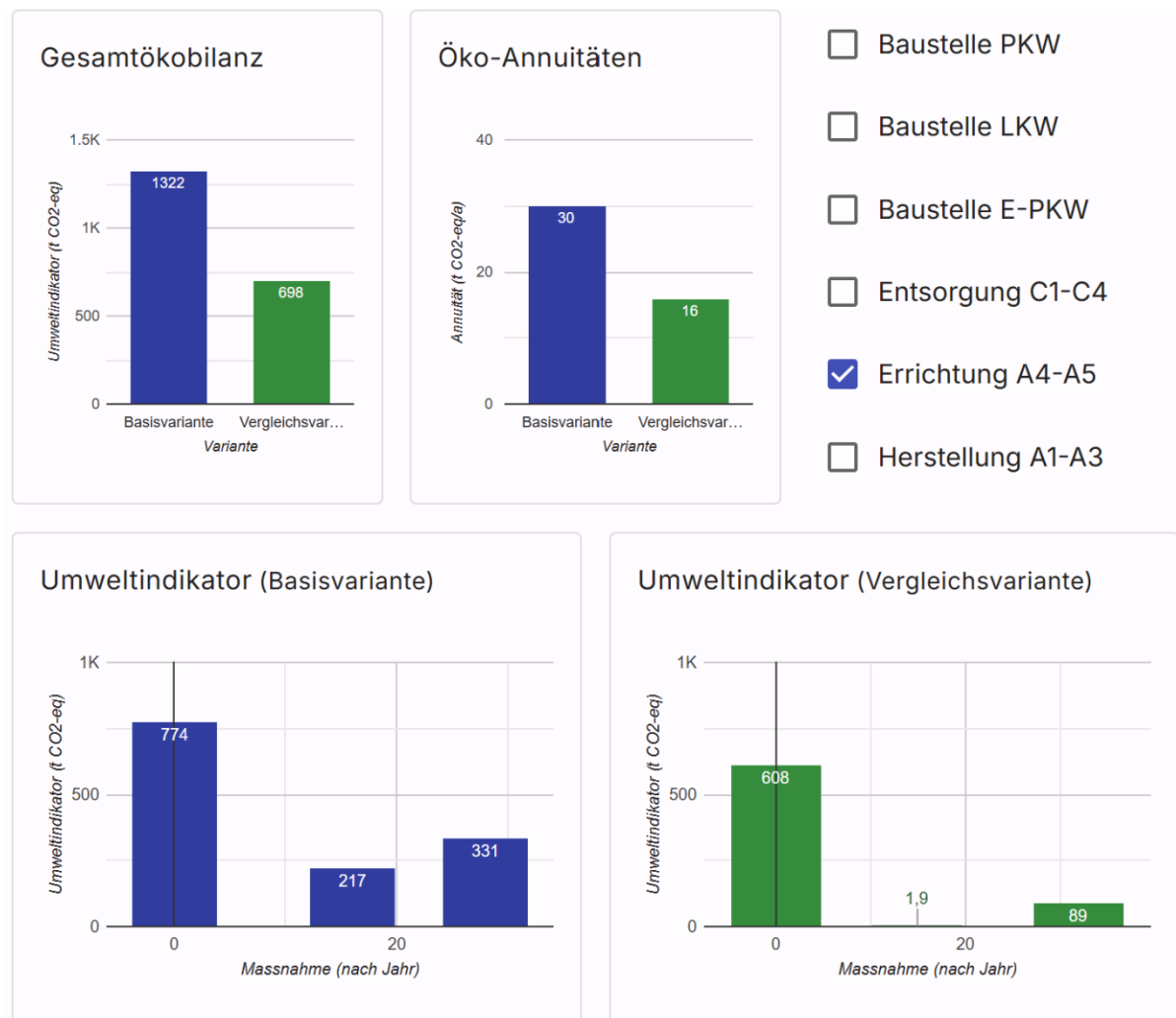


Abbildung 40: Ökologische Bewertung Teil Herstellung (Module A1 bis A3), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)

Beim Vergleich der *Errichtung* (Module A4 bis A5) ändert sich das Teilergebnis und die Treibhausgasemissionen. Die Treibhausgasemissionen sind in der Asphaltbauweise mit den intensiveren und umfangreicheren Erhaltungsmassnahmen vergleichsweise höher (Abbildung 41). Absolut gesehen ist jedoch der Anteil der *Errichtung* im Vergleich zum Anteil *Herstellung* gering (ca. 15 %), sodass Einsparungs- und Optimierungspotenziale bei den Errichtungsphasen nur bedingt vorhanden sind.

Die Analyse dieser Teilergebnisse verdeutlicht, wo aus ökologischer Sicht Einsparungs- und Optimierungspotenziale bestehen und wo Änderungen in den Eingangswerten auch zu Änderungen in den Ergebnissen führen. Diese liegen primär in den Herstellungsphasen (Module A1 bis A3) und somit bei der Auswahl der Oberbaumaterialien und deren Bearbeitungsprozessen.



**Abbildung 41: Ökologische Bewertung Teil Errichtung (Module A4 bis A5), Bsp. Österreich
(© SABINA-Bilanzrechner)**

Mit diesen Ergebnissen liegt eine weitere Entscheidungsgrundlage vor, die aus ökologischer Sicht jedoch kein eindeutiges Resultat für oder gegen eine bestimmte Variante erkennen lässt. Daher ist es sinnvoll, weitere Wirkungsbereiche zu berechnen und zu bewerten.

Der SABINA-Bilanzrechner ermöglicht zusätzlich die Bewertung der Auswirkungen von Baumassnahmen auf den Verkehr während der Bauzeiten über den gesamten Lebenszyklus. Die Abbildung 42 zeigt die direkten ökologischen Auswirkungen der Baumassnahmen auf den Verkehr und die daraus geschätzten Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus.

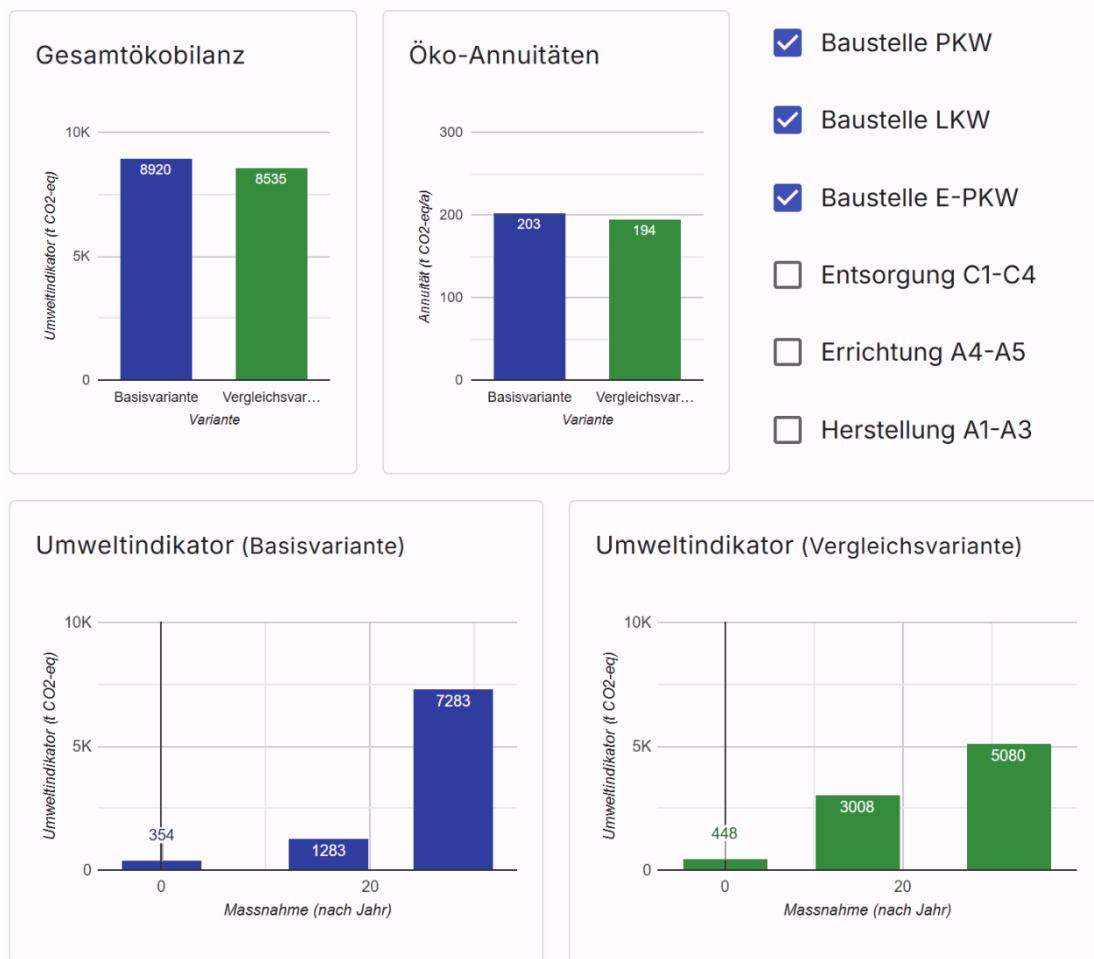


Abbildung 42: Ökologische Bewertung Wirkung Baustelle auf Verkehr (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)

Während in Abbildung 39 zunächst ein geringer Vorteil der Basisvariante ersichtlich war, kehrt sich dieser Befund bei Betrachtung dieses Teilaspekts nun um. Die höheren Werte der Asphaltbauweise sind auf die umfangreicheren baulichen Erhaltungsmassnahmen zurückzuführen, die während der Bauzeit Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und das Staugeschehen haben. Da in diesem Beispiel sehr hohe Verkehrsbelastungen vorliegen, ergeben sich daraus vor allem am Ende des Lebenszyklus entsprechende Stauwirkungen (siehe letzte Massnahme im Lebenszyklus bei beiden Varianten). Diese hängen neben der Verkehrsbelastung selbst wesentlich von der Gestaltung der Baustelle, der Leistungsfähigkeit des betroffenen Abschnitts während der Bauphase sowie der Dauer der Massnahme ab. Letztere wird durch die gewählte Produktivität sowie durch die Dauer von Einrichtung und Abbau der Baustelle beeinflusst.

Die Auflistung dieser Einflussfaktoren verdeutlicht, dass das wesentliche Einsparungs- und

Optimierungspotenzial in der effizienten Gestaltung der Baustelle und in der schnellen Umsetzung der Massnahmen liegt. Eine Reduktion der Verkehrsbelastung wäre durch eine Umleitung des Verkehrs auf eine Umleitungstrecke möglich, was im gegenständlichen Beispiel nur mit 2 % Umleitungsverkehr angesetzt wurde. Die gegebenenfalls daraus resultierenden weiteren negativen Umweltwirkungen des Umleitungsverkehrs werden im SABINA-Bilanzrechner in der derzeitigen Ausbaustufe nicht abgebildet.

Bei Betrachtung der Absolutwerte zeigt sich, dass sich die Treibhausgasemissionen durch die Baumassnahmen auf den Verkehr auf einem nahezu identischen Niveau befinden wie der Anteil durch den Bau selbst (Herstellung, Errichtung und Entsorgung). Somit hat die Baustelle und deren Wirkung auf den Verkehr ein ähnliches Einsparungs- und Optimierungspotenzial wie die Wirkungen durch den Bau. Werden alle Ergebnisse im ökologischen Bereich zusammengefasst (Abbildung 43), ist der Unterschied zwischen den beiden Varianten so gering, dass die zuvor beschriebene ökonomische Gleichwertigkeit auch für diesen Teilaspekt gilt.

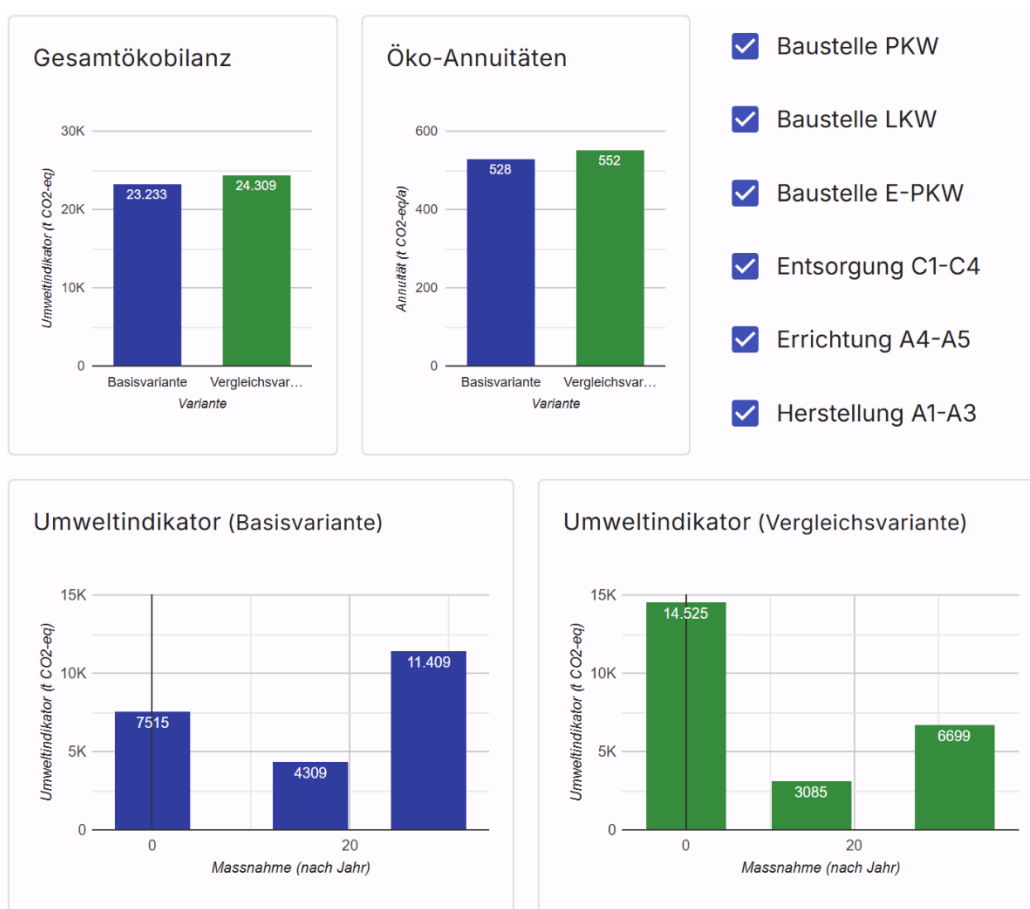


Abbildung 43: Ökologische Bewertung aller Wirkungen (alle Fahrzeugkategorien und alle Phasen), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)

8.4.2.3 Beurteilung der Langzeitwirkungen

Nun werden die Langzeitwirkungen betrachtet, insbesondere eventuelle Verbesserungseffekte und die damit verbundenen möglichen Einsparungen, die durch die Erhaltungsmassnahmen je Erhaltungsintervall erzielt werden. Der SABINA-Bilanzrechner liefert hierzu entsprechende Hilfe.

Im Vergleich zur Bewertung von Baumassnahmen unterscheiden sich nun die zugrunde liegenden Eingangsgrössen, da sie im Regelfall eine andere Genauigkeits- bzw. Qualitätsstufe aufweisen. Es wird davon abgeraten, die negativen Auswirkungen aus Bau und Verkehr mit den Einsparungen aus der Langzeitwirkung gegenzurechnen, weil die zugrunde liegenden Eingangsgrössen eine andere Genauigkeits- bzw. Qualitätsstufe aufweisen und die berechneten Werte lediglich die relative Wirkung, also das mögliche Einsparungspotenzial zwischen dem *Nichts-Tun* im jeweiligen Erhaltungsintervall und der Langzeitwirkung durch die Massnahme darstellen. Die Wirkungen des Verkehrs auf die Treibhausgasemissionen über die gesamte technische Nutzungsdauer sind in diesem Modul nicht dargestellt. Für einen relativen Vergleich ist diese Form der Ergebnisse jedoch aussagekräftig. Bewertet werden in diesem Zusammenhang die durch die Massnahmen im Folgeintervall quantifizierbaren Verbesserungen (Abbildung 44).

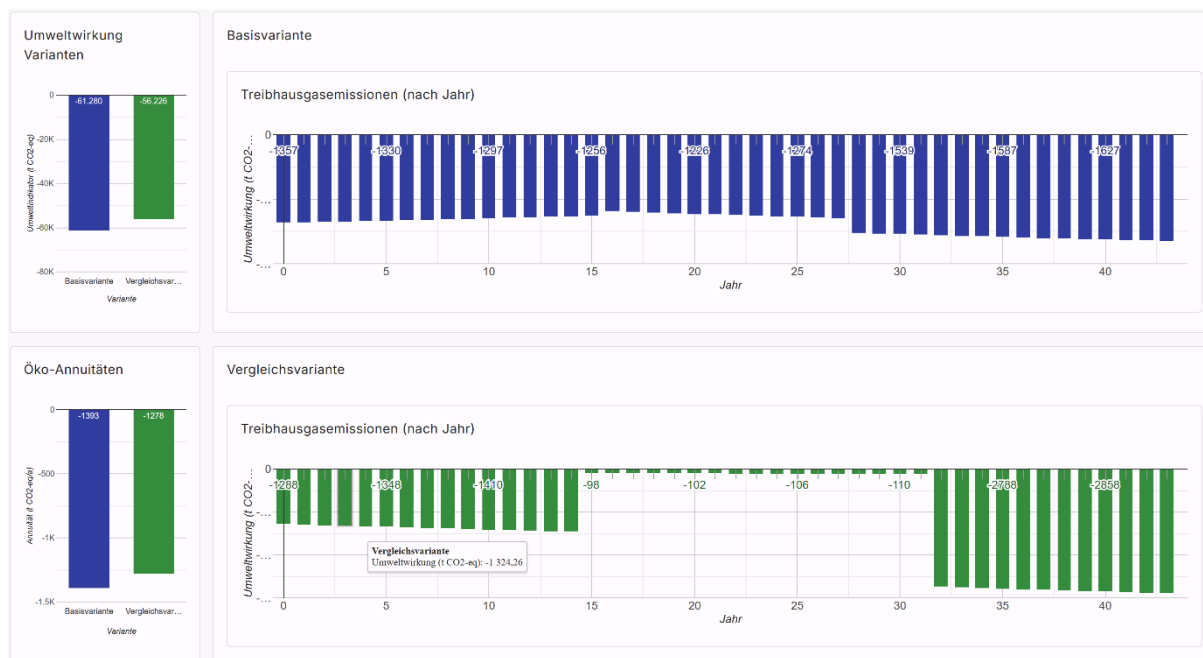


Abbildung 44: Ökologische Bewertung der Langzeitwirkungen (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)

Sind diese gering, wie etwa bei der ersten Erhaltungsmassnahme im Bereich der Betondecke (0.5 % Platteninstandsetzungen), ist auch das daraus resultierende Einsparungspotenzial gering. Eine raschere Verschlechterung der Längsebenheit im Vergleich zur *Nichts-Tun-Funktion* (gewählt auf Basis der Längsebenheitsentwicklung) des vorangegangenen Erhaltungsintervalls kann zu einer weiteren Reduktion der Einsparung führen.

Ein zusätzlicher Einflussfaktor ergibt sich aus der Entwicklung des Anteils der beiden Fahrzeugkategorien PKW und E-PKW. Da der Anteil der E-PKW im Zeitverlauf zunimmt, liefert diese Fahrzeugkategorie gegen Ende der Analyseperiode auch die grössten Einsparungen (Abbildung 45). Gleichzeitig zeigt sich hier die Sensitivität der zugrunde gelegten Annahmen. Je nach Entwicklung kann die berechnete Öko-Annuität den zunächst ermittelten Vorteil der Asphaltbauweise zugunsten der Betonbauweise verändern.

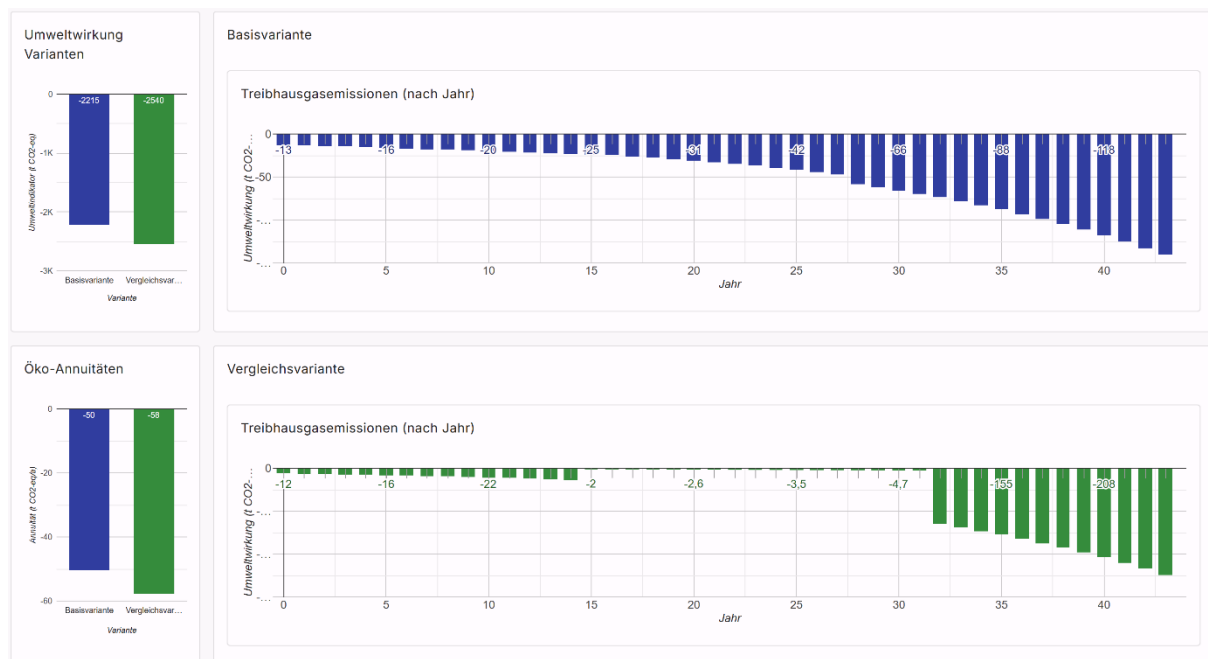


Abbildung 45: Ökologische Bewertung der Langzeitwirkungen (Fahrzeugkategorie E-PKW), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)

Anhand der Ergebnisse kann das grösste Einsparungs- und Optimierungspotenzial bei den Langzeitwirkungen mit der Qualität der Ausführung, im speziellen mit der Längsebenheit der Strasse verknüpft werden. Wird eine gute Ebenheit durch eine Massnahme erzielt, ergibt sich ein geringerer Energie- und Treibstoffverbrauch und somit geringere Treibhausgasemissionen im anschliessendem Erhaltungsintervall im Vergleich zum Fall *Nichts-Tuns*, sofern nicht die Ebenheit rasch wieder schlechter wird.

Weil in diesem Beispiel der Vergleich der Langzeitergebnisse sowohl für die Asphaltbauweise

als auch für die Betonbauweise unter den gesetzten Randbedingungen zu ähnlichen Ergebnissen führt, wären beide Varianten als *gleichwertige* Lösungen einzustufen. Weil realistische Annahmen getroffen wurden, entspricht das Ergebnis auch der Erwartungserhaltung, wenn zwei nach den RVS 03.08.63 [18] sowie ASFINAG-Planungshandbuch [98] standardisierte Bauweisen mit gleicher technischer Nutzungsdauer miteinander verglichen werden.

8.5 Vergleich Oberbauweisen mit unterschiedlichen technischen Nutzungsdauern

8.5.1 Eingangsdaten Oberbauvarianten

Für das Beispiel des Vergleichs von unterschiedlichen Oberbauweisen mit deutlich unterschiedlichen technischen Gesamtnutzungsdauern wurden die nationalen Vorgaben aus Deutschland herangezogen. Das Normalprofil des gewählten bzw. untersuchten Autobahnabschnitts entspricht daher dem Regelquerschnitt 31 (RQ 31) für vierstreifige Autobahnen gemäss nationalem Regelwerk [99]. Die Fahrstreifen weisen eine Breite von 3.75 m auf, der Abstellstreifen weist eine Breite von 3.00 m auf. Der (nicht befahrene) Randstreifen weist eine Breite von 0.75 m auf. Die beiden Richtungsfahrbahnen sind durch einen 4.00 m breiten Mittelstreifen getrennt. Die gesamte Richtungsfahrbahn weist damit eine Breite von 12.00 m auf, die Breite der Strassenkrone beträgt 31.00 m (Abbildung 46).

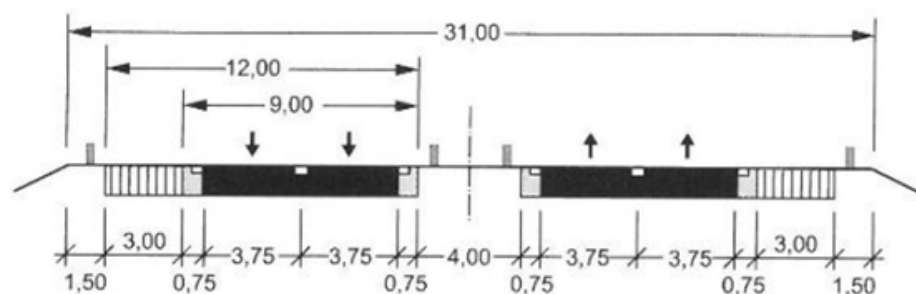


Abbildung 46: Regelquerschnitt RQ 31 [99], Bsp. Deutschland

Die gewählte Gesamtverkehrsbelastung beträgt 15'000 KFZ/24h mit einer Schwerverkehrsbelastung von 10 %.

Im Vorfeld wurde eine Oberbaudimensionierung gemäss den RStO 12 [13] (Gl. 77) für eine Bemessungsperiode von $N = 30$ Jahren durchgeführt, um die Belastungsklassen der Berechnungsvarianten 1 und 2 zu ermitteln. Der Bemessung liegt eine durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs im Nutzungsjahr $DTV_{i-1}^{(SV)}$ von 1'300 LKW/24h zugrunde. Die Parameter f_1 , f_2 und f_3 wurden mit 1 angenommen. Der Achszahlfaktor f_A beträgt 4.5 und der

mittlere jährliche Zuwachsfaktor des Schwerverkehrs f_z errechnet sich nach Gl. 78 zu 1.586. Die mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs p wird laut Tabelle 11 der RStO 12 aufgrund der Strassenklasse *Bundesautobahnen* mit 0.03 angenommen (ergibt für das Zuwachsmodel im SABINA-Bilanzrechner eine Zuwachsrate von 1,5 %).

$$B = N \cdot DTV^{(SV)} \cdot f_A \cdot q_{Bm} \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_z \cdot 365 \quad \text{Gl. 77}$$

mit

BSumme der gewichteten äquivalenten 10-t-Achsübergänge im zugrunde gelegten Nutzungszeitraum

$DTV^{(SV)}$durchschnittlich tägliche Verkehrsstärke des Schwerverkehrs im Nutzungsjahr $i-1$ [LKW/24h]

NAnzahl der Jahre des zugrunde gelegten Nutzungszeitraums

Q_{Bm}einer bestimmten Strassenklasse zugeordneter mittlerer Lastkollektivquotient, der die strassenklassenspezifische mittlere Beanspruchung der jeweiligen tatsächlichen Achsübergänge ausdrückt (Quotient aus der Summe der äquivalenten 10-t-Achsübergänge und der Summe der tatsächlichen Achsübergänge des Schwerverkehrs (SV) für einen festgelegten Zeitraum in einem Fahrstreifen)

f_{Ai-1}durchschnittliche Achszahl pro Fahrzeug des Schwerverkehrs (Achszahlfaktor) im Nutzungsjahr $i-1$ [A/Kfz]

f_{1i}Fahrstreifenfaktor im Nutzungsjahr i

f_{2i}Fahrstreifenbreitenfaktor im Nutzungsjahr i

f_3Steigungsfaktor

f_z mittlerer jährlicher Zuwachsfaktor des Schwerverkehrs

p mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs

$$f_z = \frac{(1 + p)^N - 1}{p \cdot N} \quad \text{Gl. 78}$$

mit

f_z mittlerer jährlicher Zuwachsfaktor des Schwerverkehrs

p mittlere jährliche Zunahme des Schwerverkehrs

Nach Auswertung von Gl. 77 beträgt die Summe der gewichteten äquivalenten 10-t-Achsübergängen (B -Zahl) 33.52 Millionen, weshalb beide Berechnungsvarianten 1 und 2 der Belastungsklasse Bk100 entsprechen.

Tafel 1: Bauweisen mit Asphaltdecke für Fahrbahnen auf F2- und F3-Untergrund/Unterbau

(Dickenangaben in cm; ∇ E_{v2} -Mindestwerte in MPa)

Zeile	Belastungsklasse	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2	Bk1,8	Bk1,0	Bk0,3
	B [Mio.]	> 32	> 10 - 32	> 3,2 - 10	> 1,8 - 3,2	> 1,0 - 1,8	> 0,3 - 1,0	≤ 0,3
	Dicke des frostsich. Oberbaus ¹⁾	55 65 75 85	55 65 75 85	55 65 75 85	45 55 65 75	45 55 65 75	45 55 65 75	35 45 55 65
1	Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht							
	Asphaltdecke	12	12	12	10	4	4	4 ¹⁰⁾
	Asphalttragschicht	22	18	14	12	16	14	10 ¹⁰⁾
	Frostschutzschicht	45	45	45	45	45	45	45
	Dicke der Frostschutzschicht	31 ²⁾ 41 51	25 ²⁾ 35 45 55	29 ²⁾ 39 49 59	33 ²⁾ 43 53	25 ²⁾ 35 45 55	27 37 47 57	21 31 41 51

Abbildung 47: Bauweise mit Asphaltdecke der Belastungsklasse Bk100 gemäss den RStO 12 [13], Bsp. Deutschland

Tafel 2: Bauweisen mit Betondecke für Fahrbahnen auf F2- und F3-Untergrund/Unterbau

(Dickenangaben in cm; ∇ E_{v2} -Mindestwerte in MPa)

Zeile	Belastungsklasse	Bk100	Bk32	Bk10	Bk3,2	Bk1,8	Bk1,0	Bk0,3
	B [Mio.]	> 32	> 10 - 32	> 3,2 - 10	> 1,8 - 3,2	> 1,0 - 1,8	> 0,3 - 1,0	≤ 0,3
	Dicke des frostsich. Oberbaus ¹⁾	55 65 75 85	55 65 75 85	55 65 75 85	45 55 65 75	45 55 65 75	45 55 65 75	35 45 55 65
1.1	Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln auf Frostschutzschicht bzw. Schicht aus frostunempfindlichem Material							
	Betondecke	27	26	25	24	23		
	Vliesstoff ⁸⁾	15	15	15	15	15		
	Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)	42	41	40	39	38		
	Frostschutzschicht	45	45	45	45	45		
	Dicke der Frostschutzschicht	33 ²⁾ 43	24 ²⁾ 34 44	25 ²⁾ 35 45	26 ²⁾ 36	27 ²⁾ 37		

Abbildung 48: Bauweise mit Betondecke der Belastungsklasse Bk100 gemäss den RStO 12 [13], Bsp. Deutschland

8.5.1.1 Berechnungsvariante DE-1 (Asphaltbauweise)

Die bauliche Ausgestaltung mit den zweckmässigen Asphaltmischgutsorten werden in Abhängigkeit von der Verkehrsbeanspruchung gemäss den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und den Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt – (ZTV Asphalt-StB 07/13) [14] gewählt. Die zu untersuchende Berechnungsvariante DE-1 in Asphaltbauweise genügt der Belastungsklasse Bk100.

Tabelle 38: Schichtaufbau der Berechnungsvariante DE-1, Bsp. Deutschland

Schicht	Bezeichnung	Schichtdicke [mm]	Recyclinganteil [%]
Asphaltdeckschicht	SMA 11 S	40	0
Asphaltbinderschicht	AC 16 B S	80	35
Asphalttragschicht	AC 32 T S	220	40
Fundations-/ Frostschutzschicht	RC-Asphaltgranulat 0/32 mm	510	100

Die Berechnungsvariante DE-1 mit Splittmastixasphalt der Sorte SMA 11 S als Asphaltdeckschicht wird in der (üblichen) Schichtdicke von 4.0 cm auf einer Asphaltbinderschicht der Sorte AC 16 B S mit einer Schichtdicke von 8.0 cm realisiert. Asphalttragschichtmischgut der Sorte AC 32 T S wird üblicherweise für hohe Belastungsklassen (Bk3,2 bis Bk100) vorgesehen und daher passend für die höchste Belastungsklasse Bk100 zusammengesetzt. Die Schichtdicke der Asphalttragschicht AC 32 T S beträgt 22.0 cm. Für die Frostschutzschicht wird einheitlich ein ungebundenes Baustoffgemisch in den Korngrößen 0/32 mm festgelegt, konform mit den *Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau* (TL SoB-StB, Ausgabe 2020) [100].

Für den Bau des Autobahnabschnitts werden ausschliesslich dieselbetriebene Baumaschinen und Lastkraftwagen verwendet. Dies entspricht dem derzeit am weitesten verbreiteten Antriebssystem. Die Asphaltmischsorten für den Bau des Autobahnabschnitts werden aus einer 50 km entfernten Asphaltmischanlage angeliefert. Zur Asphaltproduktion wird ein durchschnittlicher deutscher Strommix verwendet, die Wärme wird aus Erdgas bereitgestellt. Zwischen den jeweiligen Asphaltsschichten wird zur Verbesserung des Schichtverbunds eine Bitumenemulsion als Haftschrift mit einem Flächengewicht von 0.3 kg/m² eingebaut. Die Haftschrift wird mit grober Gesteinskörnung aus Korngrößen 2 bis 32 mm mit einem Flächengewicht von 2 kg/m² abgestreut. Zusätzlich wird eine Suspension aus Kalkhydrat mit einem Flächengewicht von 0.3 kg/m² aufgetragen.

Zur Modellierung des Lebenszyklus wurden für die unterschiedlichen Asphaltsschichten die theoretischen Nutzungsdauern aus der *Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstrassengesetz und dem Bundeswasserstrassengesetz* (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung - ABBV) [96] entnommen und leicht angepasst.

Tabelle 39: Nutzungsdauern unterschiedlicher Strassenschichten in der Asphaltbauweise, Beispiel Deutschland

Schicht	Theoretische Nutzungsdauer [a] gemäss [96]	Angenommene Nutzungsdauer [a]
Asphaltdeckschicht	15	20
Asphaltbinderschicht	20	20
Asphalttragschicht	40	40
Foundations-/ Frostschutzschicht	80	80

Die Nutzungsdauer der Deckschicht aus Splittmastixasphalt (SMA 11 S) wurde gegenüber der theoretischen Nutzungsdauer aus der ABBV [96] um 5 Jahre verlängert. Auf diese Weise erreichen die Asphaltdeck- und -binderschicht das Ende ihrer Nutzungsdauer zum selben Zeitpunkt. Dies entspricht der gängigen Praxis. Anhand der angenommenen Nutzungsdauern für die unterschiedlichen Asphaltsschichten ergibt sich für Berechnungsvariante DE-1 folgender Lebenszyklus (Abbildung 49).

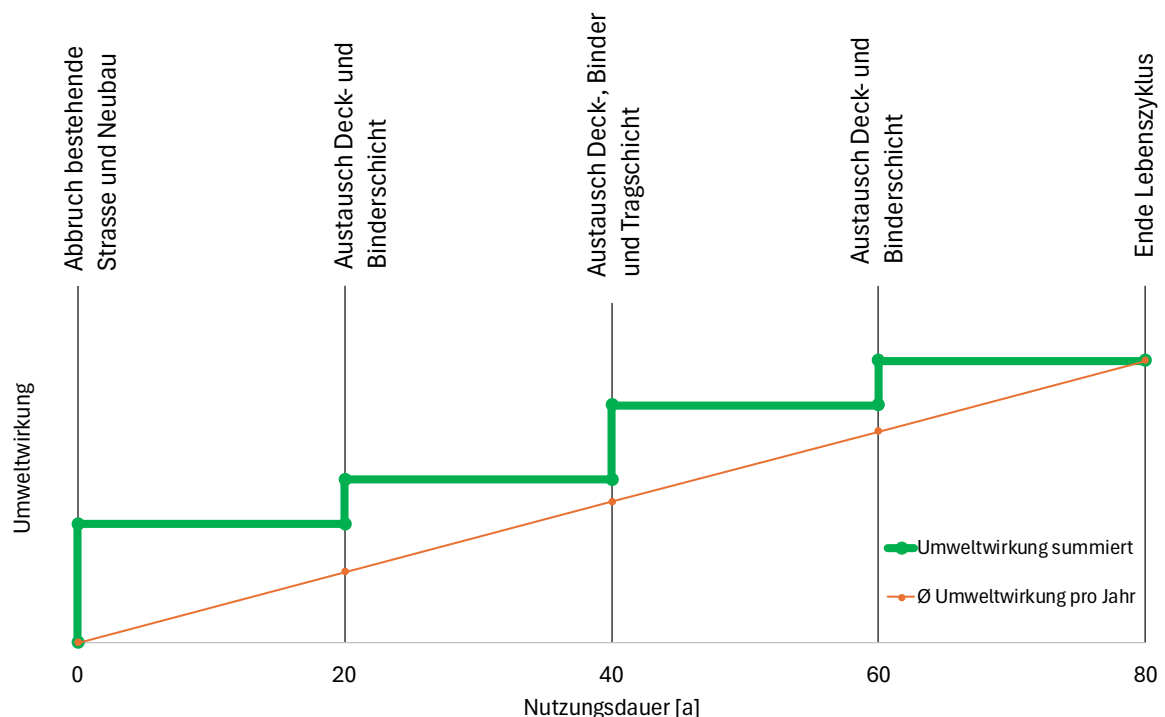


Abbildung 49: Lebenszyklus der Berechnungsvariante DE-1, Bsp. Deutschland

Zu Beginn der Lebenszyklusbetrachtung wird eine bestehende Strasse mittels dieselbetriebener Baumaschinen vollständig zurückgebaut. Der Rückbau erfolgt durch Aufbrechen des Strassenoberbaus in Schollen. Es wird angenommen, dass dieser Aufbau identisch zum Neubau (Erneuerung) ist. Der rückgebaute Asphalt wird zu 63.4 % stofflich rezykliert und zu 36.6 % deponiert. Sowohl die Aufbereitungsanlage (Asphaltemischanlage) als auch die Deponie liegen in einer Entfernung von 50 km zur Baustelle. Nach dem vollständigen Rückbau der Strasse erfolgt ein Neubau gemäss Tabelle 38. Rund 20 Jahre nach dem Neubau erfolgt ein erster Austausch von Asphaltdeck- und -binderschicht. Deren Abbruch erfolgt mittels Fräsen.

Weitere 20 Jahre später, also 40 Jahre nach dem Neubau erfolgt ein Austausch von Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschicht, da die Tragschicht das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht hat. Abermals erfolgt der Rückbau mittels Fräsen. Nach weiteren 20 Jahren

erfolgt ein erneuter Austausch von Asphaltdeck- und -binderschicht. Rund 80 Jahre nach dem vollständigen Neubau hat der Strassenaufbau das Ende seines Lebenszyklus erreicht und der Betrachtungszeitraum endet.

Ein Rückbau des gesamten Strassenaufbaus wird nicht betrachtet, da dieser bereits zu Beginn der Lebenszyklusbetrachtung bilanziert wurde. Dieses Szenario widerspiegelt die Realität, da in den meisten Fällen bereits ein bestehender Strassenaufbau vorliegt, welcher ausgetauscht wird.

Für alle beschriebenen Massnahmen wird die Zustandsprognose der Längsebenheit einheitlich auf Basis von IRI-Werten vor und nach der Massnahme sowie der jeweiligen Änderungsrate vor und nach der Massnahme definiert. Die Festlegung erfolgt in identischer Form unter Heranziehung der Empfehlungen des österreichischen PMS-Handbuchs [44], sodass auf eine Umrechnung von AUN-Werten in IRI-Werte an dieser Stelle verzichtet werden kann. Die Werte der Berechnungsvariante DE-1 können der Tabelle 40 entnommen werden.

Tabelle 40: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante DE-1, Bsp. Deutschland

Variante DE-1 – Asphalt	IRI [m/km]			
	M1	M2	M3	M4
Längsebenheit vor der Massnahme	2.4	2.4	3	3.2
Änderungsrate Längsebenheit vor der Massnahme	0.08	0.1	0.1	0.1
Längsebenheit nach der Massnahme	0.8	1	0.8	1
Änderungsrate Längsebenheit nach der Massnahme	0.12	0.12	0.08	0.12

Als Eingangsgrössen für die ökonomische Bewertung der Lebenszykluskosten müssen die Kosten der Massnahmen angegeben werden. Die Kosten für Berechnungsvariante DE-1 sind in Tabelle 41 dargestellt und wurden in Anlehnung an die Vorschläge im Forschungsprojekt TAniA gewählt [1]. Die Valorisierung wird mit 2.5 % angenommen und der Diskontierungszinssatz beträgt 3 %.

Tabelle 41: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante DE-1, Bsp. Deutschland

Variante DE-1 – Asphalt	Jahr	Kosten [€]
M1 – Neubau	0	15'600'000
M2 – Asphaltdeck- und -binderschicht	20	2'400'000
M3 – Deck-, Binder- und Tragschicht	40	4'200'000
M4 – Austausch Deck- und Binderschicht	60	2'400'000

8.5.1.2 Berechnungsvariante DE-2 (Betonbauweise)

Bezüglich der Betonbauweise wird eine Bauweise entsprechend den RStO 12 festgelegt. Die Oberfläche der Betonfahrbahndecke wird in Waschbetonbauweise ausgeführt. Die Betondecke wird in einen Oberbeton mit einer Schichtdicke von 5 cm und einen Unterbeton mit einer Schichtdicke von 22 cm unterteilt. Zusammen mit der Dicke des frostsicheren Aufbaus von 85 cm ergeben sich die Schichtdicken gemäss Tabelle 42. Die Berechnungsvariante DE-2 in Betonbauweise genügt der Belastungsklasse Bk100.

Tabelle 42: Schichtaufbau der Berechnungsvariante DE-2, Bsp. Deutschland

Schicht	Bezeichnung	Schichtdicke [mm]	Zement-sort
Oberbeton	OB 0/8 (Waschbeton)	50	CEM I 42.5 N (sd)
Unterbeton	UB 0/32	220	CEM I 42.5 N (sd)
Hydraulisch geb. Tragschicht	HGT	150	CEM I 42.5
Fundations-/ Frostschutzschicht	RC-Asphaltgranulat 0/32 mm	430	-

Für die Frostschutzschicht (FSS) wird einheitlich ein gebundenes Baustoffgemisch in den Korngrössen 0/32 festgelegt, konform mit den *Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Strassenbau* (TL SoB-StB 20) [100].

Für den Bau des Autobahnabschnitts werden ausschliesslich dieselbetriebene Baumaschinen und Lastkraftwagen verwendet. Die hydraulisch gebundenen Baustoffe werden aus einem Betonwerk geliefert, welches in einer Entfernung von 50 km zur Baustelle liegt. Zur Produktion des Betons wird der durchschnittliche deutsche Strommix verwendet.

Standardmässig werden die Platten der Betondecken im Bereich der Querfugen mit Stahldübeln und im Bereich der Längsfugen mit Stahllankern ausgeführt. Der daraus resultierende Armierungsgehalt liegt bei ca. 11 kg/m³. Zur Vermeidung von wilden Schwindrissen werden die Betonplatten mittels Scheinfugen rasterförmig unterteilt und die Fugen mit einer bitumenhaltigen Fugenmasse mit einem Flächengewicht von 0.20 kg/m² verschlossen. Der Abstand der Querfugen beträgt 5.50 m.

Die Lebenszyklusbetrachtung von Berechnungsvariante DE-2 beginnt mit dem Rückbau einer bestehenden Betonstrasse, die in ihrem Aufbau der Neubauvariante entspricht (Erneuerung). Rund 20 Jahre nach dem Neubau finden erste Instandsetzungsarbeiten an den Betonplatten statt. Dabei wird angenommen, dass die Instandsetzungsarbeiten dem Austausch von 1 % der

Betonplatten (Ober und Unterbeton) entsprechen. 32 Jahre nach dem Neubau bzw. 12 Jahre nach den letzten Instandsetzungsarbeiten finden erneute Instandsetzungsarbeiten an den Betonplatten statt. Dieses Mal wird angenommen, dass rund 5 % der Betonplatten (Ober- und Unterbeton) ausgetauscht werden.

Sämtliche Baumassnahmen erfolgen mittels dieselbetriebener Baumaschinen und der Rückbau geschieht mittels Aufbrechen der Betonfahrbahndecke in Schollen. Der rückgebaute Beton wird zu 67 % stofflich recycelt und zu 33 % deponiert. Sowohl die Aufbereitungsanlage als auch die Deponie liegen in einer Entfernung von 50 km zur Baustelle. Aus den angenommenen Nutzungsdauern ergibt sich für die Berechnungsvariante DE-2 der Lebenszyklus in Abbildung 50.

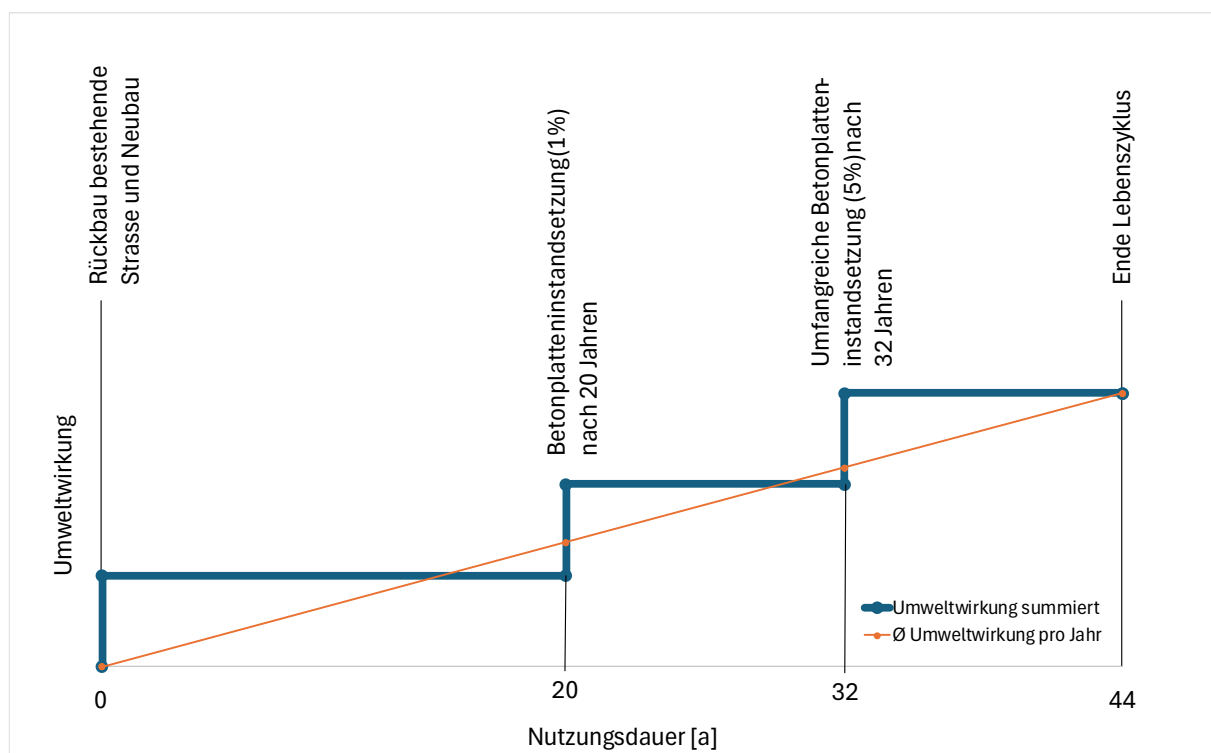


Abbildung 50: Lebenszyklus der Berechnungsvariante DE-2, Bsp. Deutschland

Für alle beschriebenen Massnahmen der Variante DE-2 erfolgt eine Zustandsprognose der Längsebenheit ebenfalls auf Basis der im österreichischen PMS-Handbuch [44] empfohlenen IRI-Werte vor und nach der Massnahme sowie der darin enthaltenen Änderungsraten. Die Werte der Berechnungsvariante DE-2 können der Tabelle 43 entnommen werden.

Als Eingangsgrössen für die Lebenszykluskostenanalyse müssen die Kosten der Massnah-

men angegeben werden. Die Kosten für Berechnungsvariante DE-2 sind in Tabelle 44 dargestellt. Die Valorisierung wird mit 2.5 % angenommen und der Diskontierungszinssatz beträgt 3 %.

Tabelle 43: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante DE-2, Bsp. Deutschland

	IRI [m/km]		
	M1	M2	M3
Variante DE-2 – Beton			
Längsebenheit vor der Massnahme	2.4	2.4	3.26
Änderungsrate Längsebenheit vor der Massnahme	0.08	0.08	0.08
Längsebenheit nach der Massnahme	0.8	2.3	2.86
Änderungsrate Längsebenheit nach der Massnahme	0.12	0.12	0.12

Tabelle 44: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante DE-2, Bsp. Deutschland

Variante DE-2 – Beton	Jahr	Kosten [€]
M1 – Neubau	0	15'600'000
M2 – Asphaltdeck- und -binderschicht	20	1'200'000
M3 – Asphaltdeck-, -binder- und -tragschicht	30	6'000'000

8.5.2 Ergebnisse

Das Beispiel Deutschland zielt ab auf die Analyse zweier unterschiedlicher Bauweisen (Asphalt und Beton) und die Identifikation möglicher Einsparungs- und Optimierungspotenziale. Ein direkter Vergleich der beiden Berechnungsvarianten im SABINA-Bilanzrechner ist dabei nicht vorgesehen, da die beiden Berechnungsvarianten unterschiedliche technische Nutzungsdauern aufweisen. Im SABINA-Bilanzrechner kann die technische Nutzungsdauer bzw. die Analyseperiode in der aktuellen Ausbaustufe nur projektspezifisch definiert werden. Für das Beispiel müssen daher die Eingangs- und Verkehrsdaten (Tagesganglinie, technische Nutzungsdauer, Baustelleninformationen etc.) beider Varianten identisch sein.

Ein indirekter Vergleich ist im SABINA-Bilanzrechner trotzdem möglich, denn es besteht die Möglichkeit, zwei separate Projekte mit unterschiedlichen technischen Nutzungsdauern bzw. Analyseperioden anzulegen und miteinander zu vergleichen. Ein solcher Vergleich ist insbesondere in frühen Planungsphasen sinnvoll, um mögliche Lösungsansätze zu bewerten.

In diesem Beispiel entspricht die *Basisvariante* der Asphaltbauweise (Berechnungsvariante DE-1, siehe 8.5.1.1), während die *Vergleichsvariante* jene in Betonbauweise (Berechnungsvariante DE-2, siehe 8.5.1.2) darstellt. Welche Variante als Basis und welche als Vergleich definiert wird, liegt im Ermessen der Anwenderin.

8.5.2.1 Ökonomische Bewertung der Massnahmen

Die Abbildung 52 (*Asphaltbauweise*, Berechnungsvariante DE-1) und die Abbildung 52 (*Betonbauweise*, Berechnungsvariante DE-2) zeigen die Berechnungsergebnisse aus der ökonomischen Bewertung. Sie veranschaulichen, dass die über den Lebenszyklus anfallenden Kosten erheblich variieren.

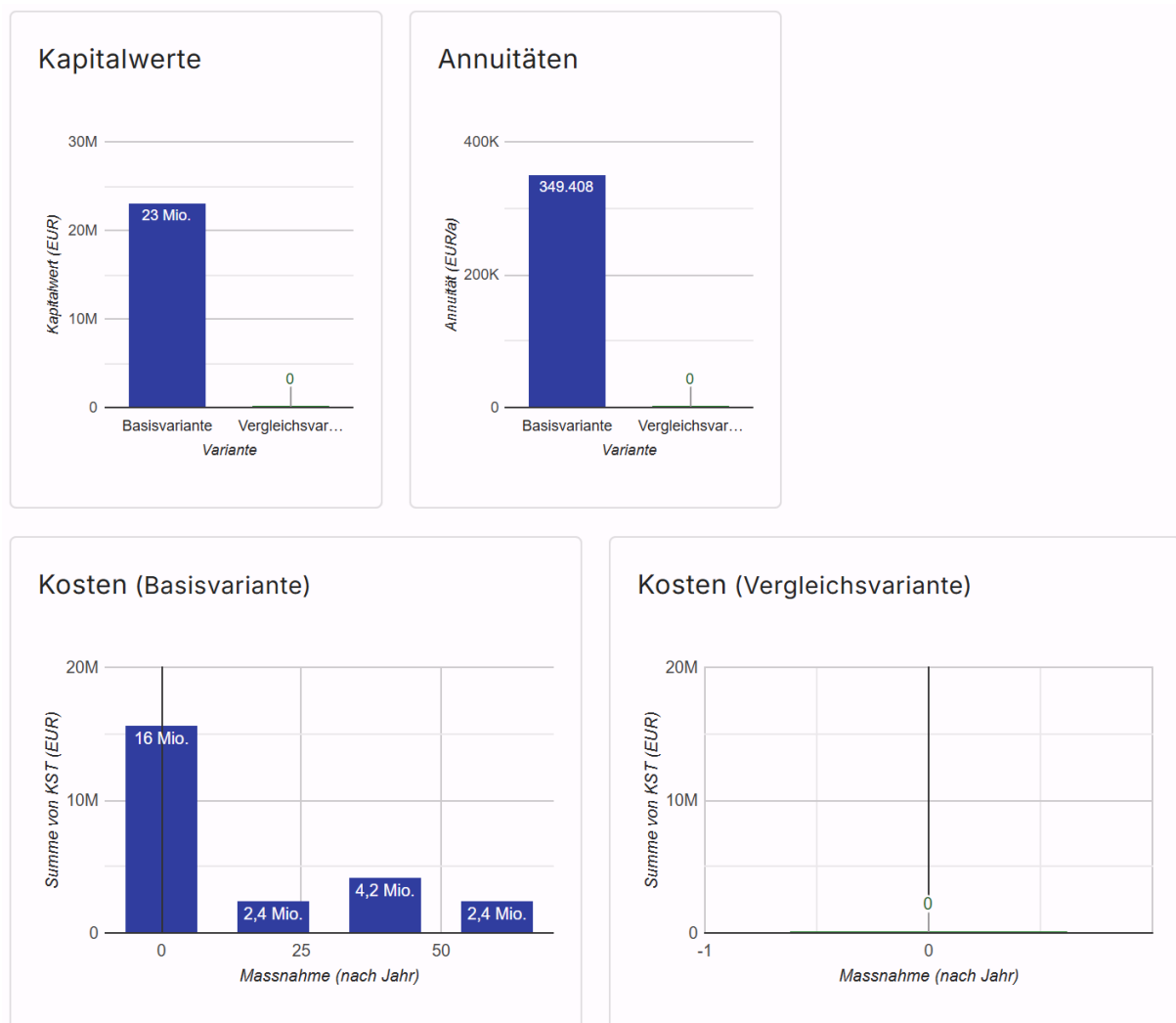
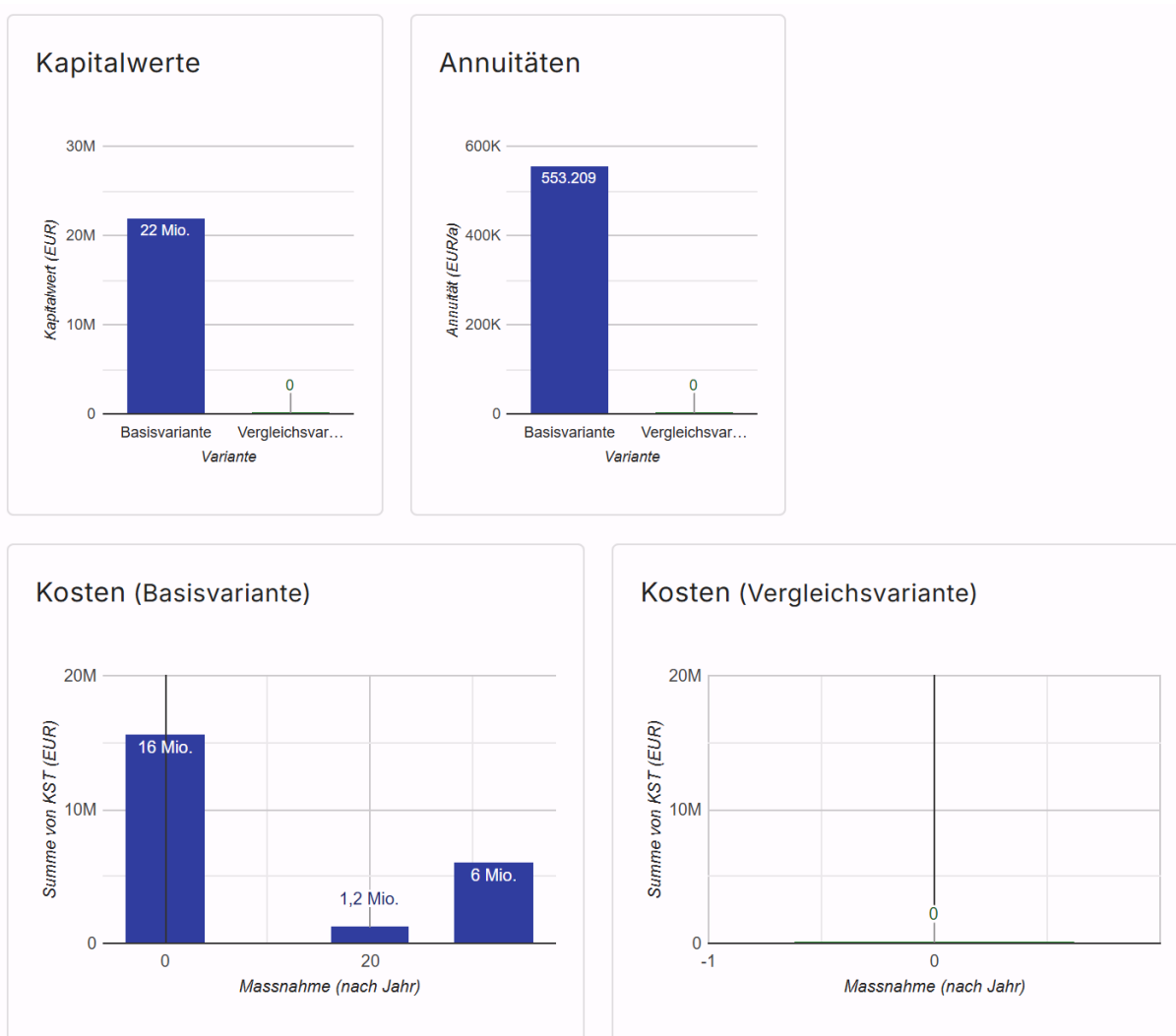


Abbildung 51: Ökonomische Bewertung, Asphaltbauweise (DE-1), Bsp. Deutschland (© SABINA-Bilanzrechner)

Neben den Kosten variiert auch die Anzahl der baulichen Erhaltungsmassnahmen. Während bei der Asphaltbauweise über die Analyseperiode vier bauliche Erhaltungsmassnahmen vorgesehen sind, sind es bei der Betonbauweise nur drei. Die Anfangsinvestition ist in beiden Varianten identisch, aber wegen der grösseren Anzahl an baulichen Erhaltungsmassnahmen in der Asphaltbauweise liegt hier der Kapitalwert höher als jener der Variante in Betonbauweise (ca. 5 %). Bei der Annuität zeigt sich ein gegensätzliches Bild. Wegen der längeren Analyseperiode in der Asphaltbauweise (80 Jahre) gegenüber der Betonbauweise (44 Jahre) liegt die Annuität in der Asphaltbauweise ca. 35 % niedriger als jene für die Betonbauweise.



**Abbildung 52: Ökonomische Bewertung, Betonbauweise (DE-2), Bsp. Deutschland
(© SABINA-Bilanzrechner)**

Die entscheidende Einflussgrösse für eine Verbesserung der ökonomischen Bewertung liegt einerseits bei den geschätzten Massnahmenkosten und andererseits in der Wahl der Erhaltungsmassnahmen und -intervalle. Einsparungspotenziale ergeben sich insbesondere bei einer Verlängerung der Erhaltungsintervalle, sofern die am Ende dieser Intervalle durchzuführenden Massnahmen nicht kostenintensiver ausfallen. Dies ist eventuell realisierbar, wenn entweder Materialien höherer Dauerhaftigkeit verwendet werden, die Bauausführung die Mindestanforderungen vorteilhaft übertrifft oder der Oberbau eine höhere Belastbarkeit als rechnerisch erforderlich aufweist und damit länger haltbar ist. Umgekehrt kann dies zu höheren Anfangsinvestitionen führen. Daher ist nicht der Kapitalwert, sondern die Annuität die entscheidende Bewertungsgrösse zur Quantifizierung von Optimierungs- und Einsparpotenzialen.

8.5.2.2 Ökologische Bewertung der Massnahmen

Für die ökologische Bewertung der beiden Berechnungsvarianten in Deutschland, wurde das *Global Warming Potential* (GWP) herangezogen. In Abbildung 53 (Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1) und in Abbildung 54 (Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2) sind die direkten Umweltauswirkungen der beiden Berechnungsvarianten entsprechend den jeweiligen Lebenszyklusphasen abgebildet.

In der Gesamtökobilanz weist die Asphaltbauweise knapp 60 % höhere Treibhausgasemissionen auf, was auf die höhere Anzahl an Erhaltungsmassnahmen zurückzuführen ist. Bei der Öko-Annuität zeigt sich ein gegensätzliches Bild und die Asphaltbauweise weist aufgrund der längeren Analyseperiode 13 % niedrigere Treibhausgasemissionen auf.

In der ökologischen Detailbetrachtung zeigt sich, welche Massnahmen während der Analyseperiode den grössten Beitrag an Treibhausgasemissionen zur Gesamtökobilanz beitragen. In beiden Varianten verursacht die Neubaumassnahme zu Beginn der Analyseperiode die höchsten Treibhausgasemissionen. Während sämtliche Erhaltungsmassnahmen über die Analyseperiode in der Asphaltbauweise knapp 60 % der gesamten Treibhausgasemissionen ausmachen, sind diese in der Betonbauweise lediglich für 4 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich.

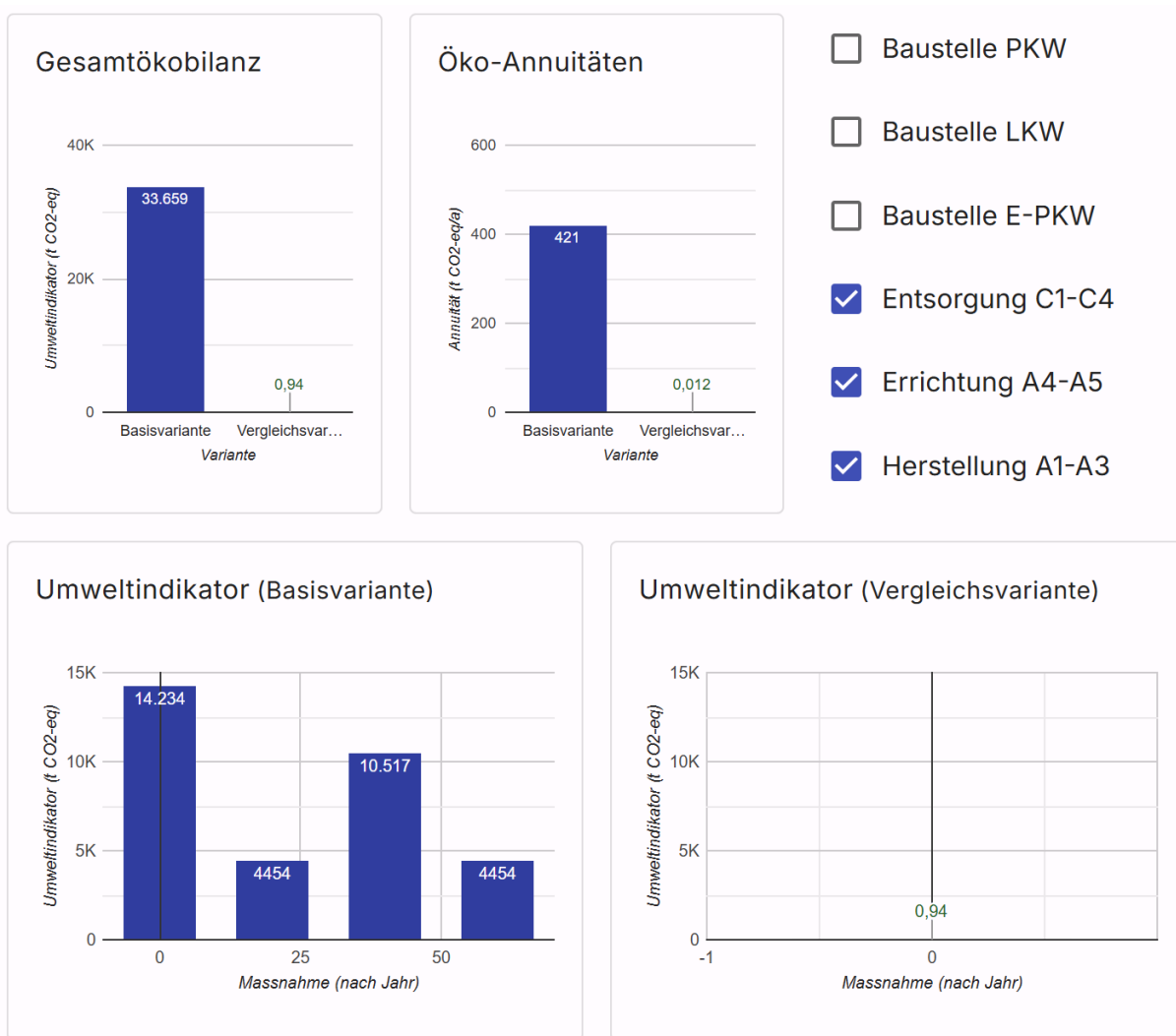


Abbildung 53: Ökologische Bewertung, Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1 (© SABINA-Bilanzrechner)

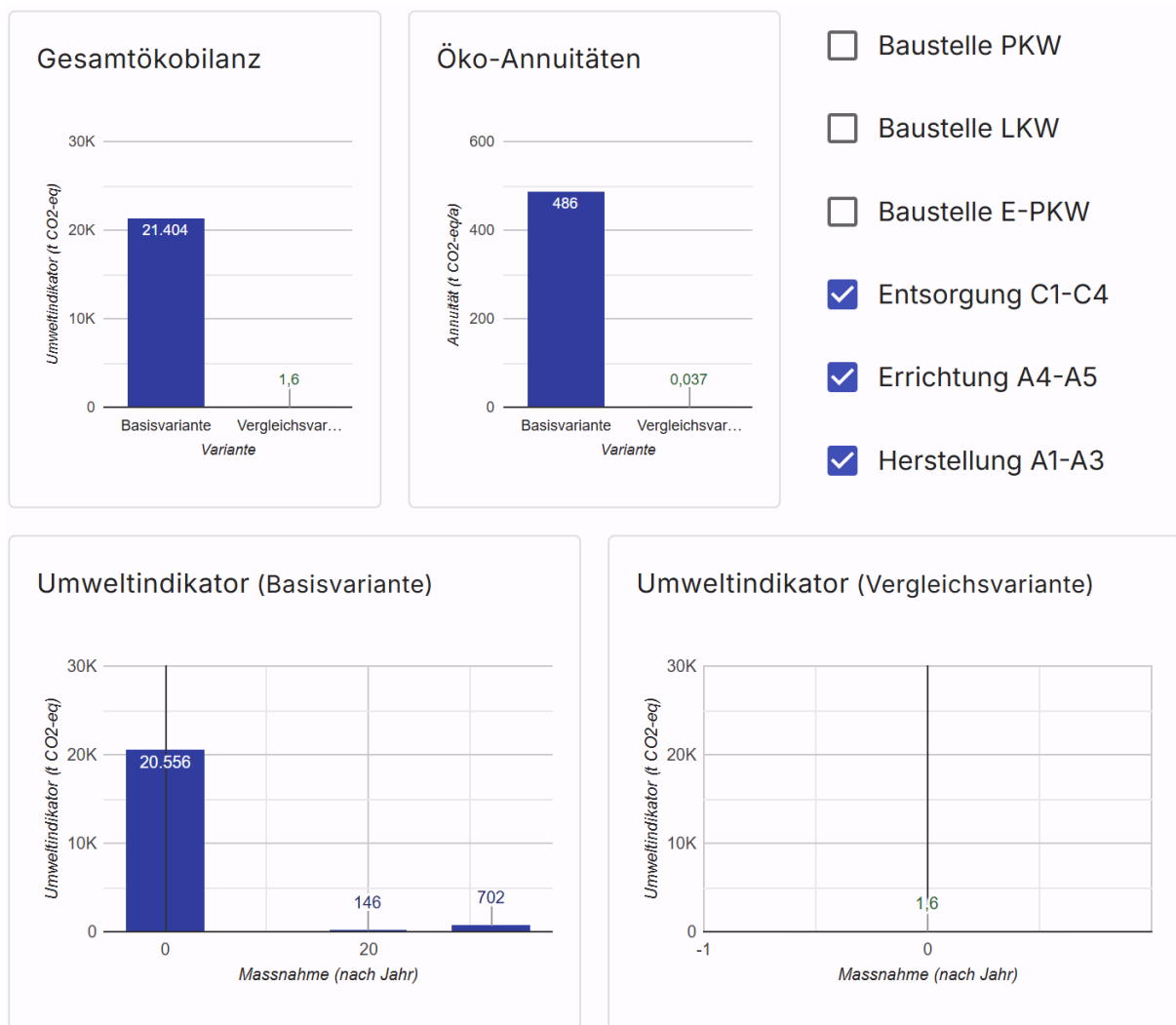


Abbildung 54: Ökologische Bewertung, Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner)

Eine getrennte Betrachtung einzelner Lebenszyklusphasen zeigt, woher diese signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Berechnungsvarianten kommen.

Die Abbildung 55 und die Abbildung 56 zeigen einen Vergleich in der Phase der *Herstellung* (Module A1 bis A3) der beiden Berechnungsvarianten. Die Asphaltbauweise weist in der Gesamtökobilanz rund 37 % höhere Treibhausgasemissionen auf als die Betonbauweise. Bei Betrachtung der Öko-Annuität zeigt sich ein anderes Bild: Die Asphaltbauweise weist ca. 25 % niedrigere jährliche Treibhausgasemissionen auf als die Betonbauweise. Diese Umkehr ist auf die deutlich längere Analyseperiode in der Asphaltbauweise zurückzuführen und verdeutlicht abermals, dass nicht die Gesamtökobilanz, sondern die Öko-Annuität die entscheidende Grösse zur ökologischen Beurteilung ist.

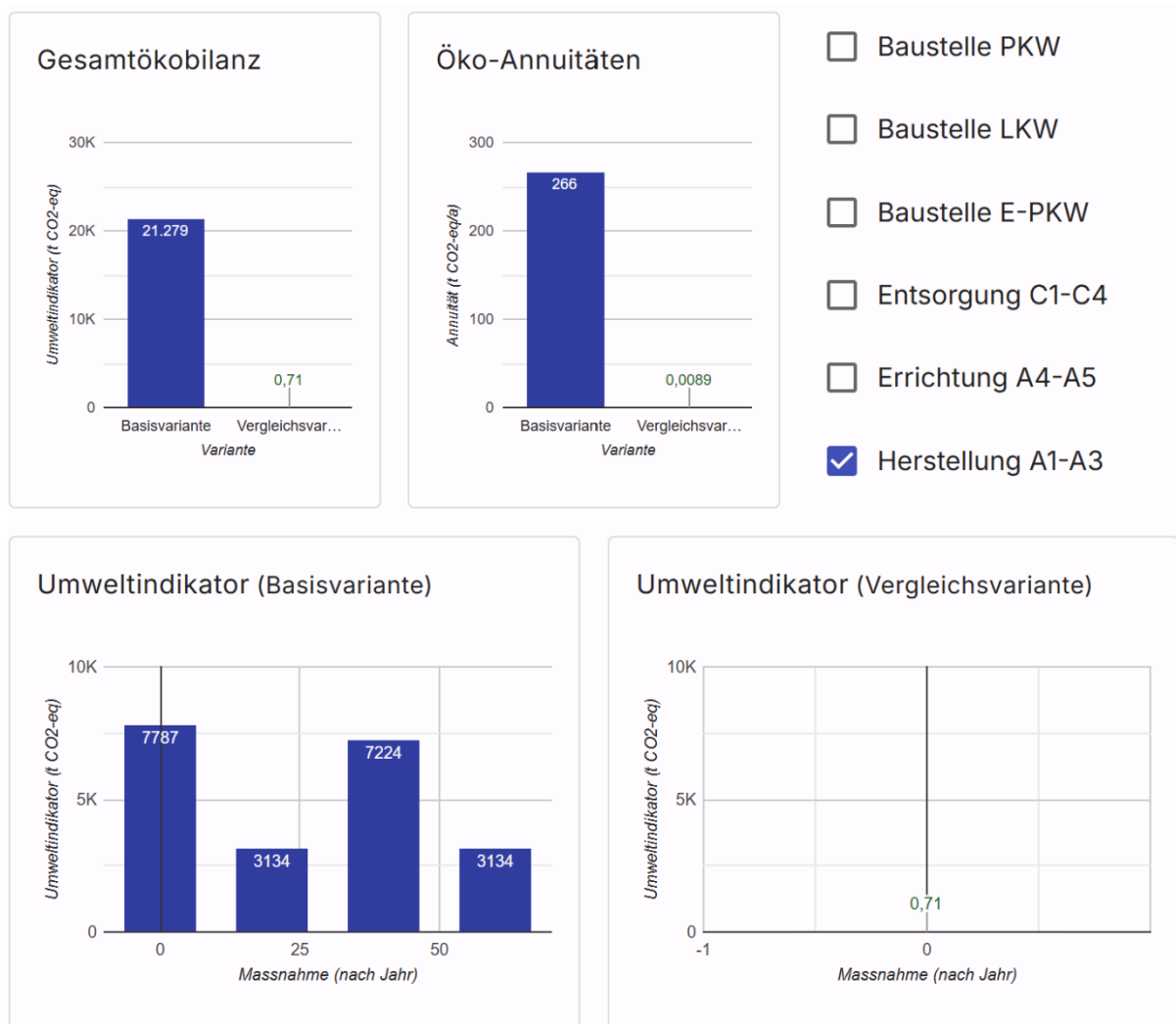


Abbildung 55: Ökologische Bewertung der *Herstellung* (Module A1 bis A3), Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1 (© SABINA-Bilanzrechner)

Die ökologische Detailbetrachtung zeigt abermals, dass der Neubau zu Beginn der Analyseperiode die höchsten Treibhausgasemissionen verursacht. Auffallend ist dabei, dass der Neubau in der Betonbauweise rund 95 % der gesamten Treibhausgasemissionen verursacht. Dies ist auf die im Vergleich zu den Erhaltungsmassnahmen grossen Mengen an Beton zurückzuführen. Als Erhaltungsmassnahme wurde angenommen, dass jeweils nur 1 %, bzw. 5 % der Betondecke ausgewechselt werden.

Weiter fällt auf, dass der Neubau zu Beginn der Analyseperiode in der Betonbauweise rund 1.9-mal mehr Treibhausgasemissionen verursacht als in der Asphaltbauweise. Dieser signifikante Unterschied ist auf die unterschiedlichen Bindemittel sowie die unterschiedlichen

Schichtstärken zurückzuführen. Der im Beton enthaltene Zement verursacht hohe Treibhausgasemissionen. Hinzukommt, dass die hydraulisch gebundenen Schichten (Ober-, Unterbeton und HGT) eine höhere Schichtstärke aufweisen als die bitumengebundenen Schichten in der Asphaltbauweise (wobei die Schichtstärke des gesamten Oberbaus identisch ist).

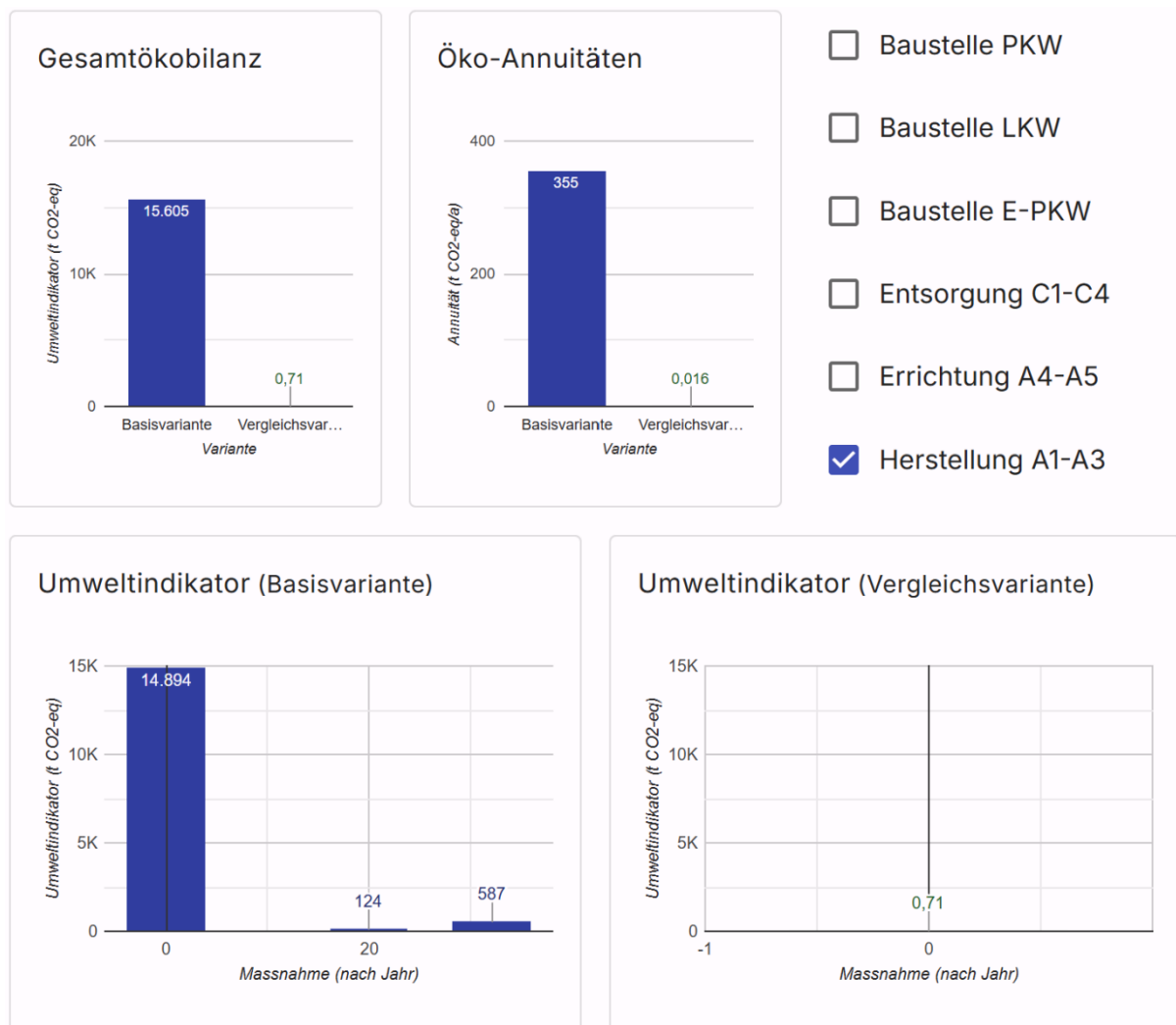


Abbildung 56: Ökologische Bewertung der *Herstellung* (Module A1 bis A3), Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner)

Ein Vergleich der Phase *Errichtung* (Module A4 bis A5) zeigt, dass in der Gesamtökobilanz die Asphaltbauweise nahezu doppelt so viele Treibhausgasemissionen emittiert als die Betonbauweise (vgl. Abbildung 57 und Abbildung 58). Die Begründung liegt in der höheren Anzahl an Erhaltungsmassnahmen sowie der damit verbundenen Treibhausgasemissionen aus dem Bau und dem Materialtransport. In der Asphaltbauweise werden über die gesamte Analysepe-

riode deutlich grössere Mengen an Material verbaut und transportiert als bei der Betonbauweise. Bei Betrachtung der Öko-Annuität relativiert sich diese Differenz. Die jährlichen Treibhausgasemissionen in der Asphaltbauweise liegen nur 4 % höher als jene der Betonbauweise und sind somit als nahezu identisch zu betrachten.

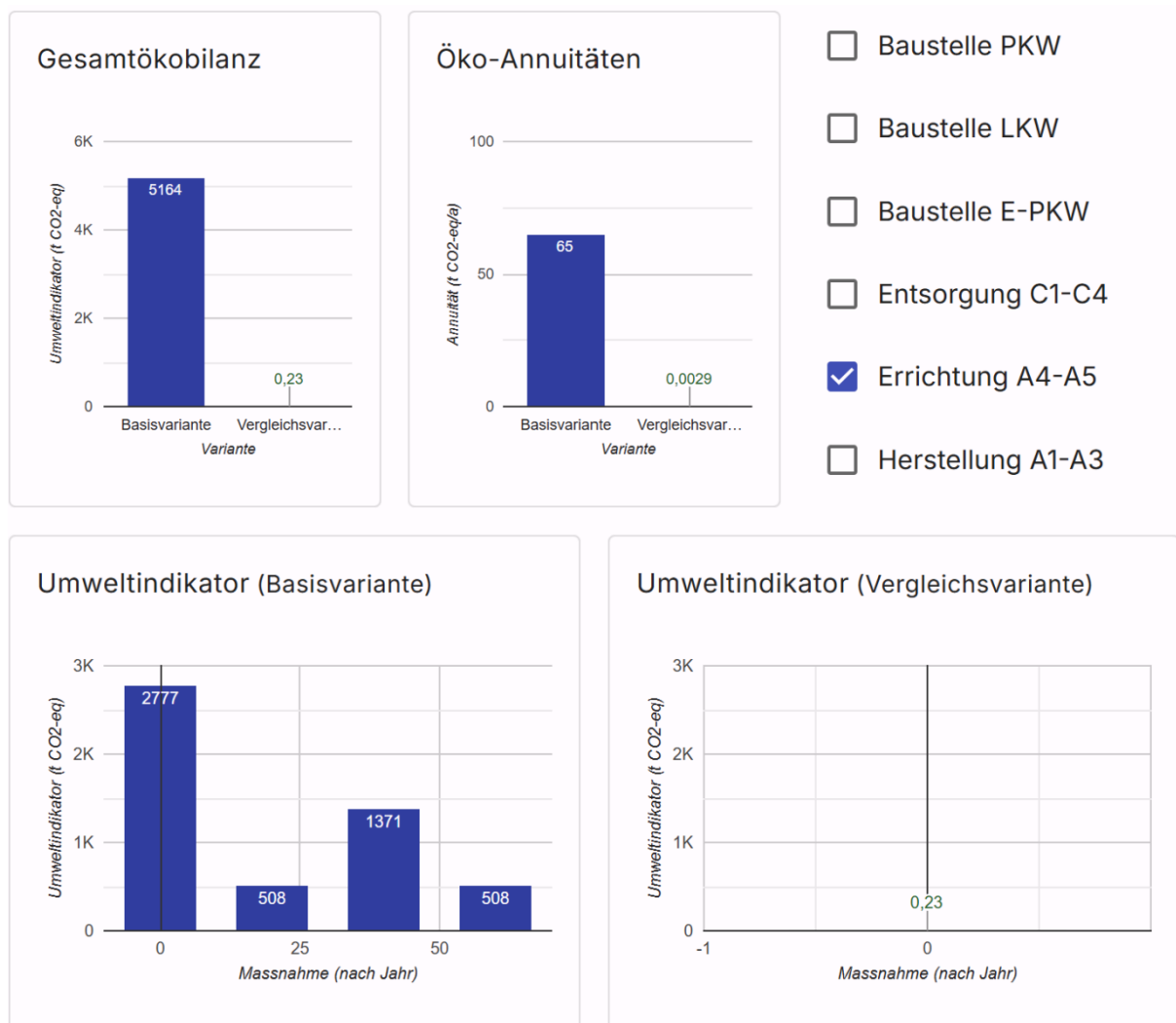


Abbildung 57: Ökologische Bewertung der Errichtung (Module A4 bis A5), Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1 (© SABINA-Bilanzrechner)

Die Lebenszyklusphase der Errichtung verursacht ca. 15 % der Treibhausgasemissionen der direkten Umweltauswirkungen (vgl. Abbildung 53), sodass Einsparungs- und Optimierungspotenziale nur bedingt vorhanden sind. Der Vergleich zeigt aber, dass durch die Wahl von nachhaltigen Antriebssystemen für Baumaschinen und Transportmittel, sowie einer geringeren Anzahl an Erhaltungsintervallen die Treibhausgasemissionen reduziert werden können.

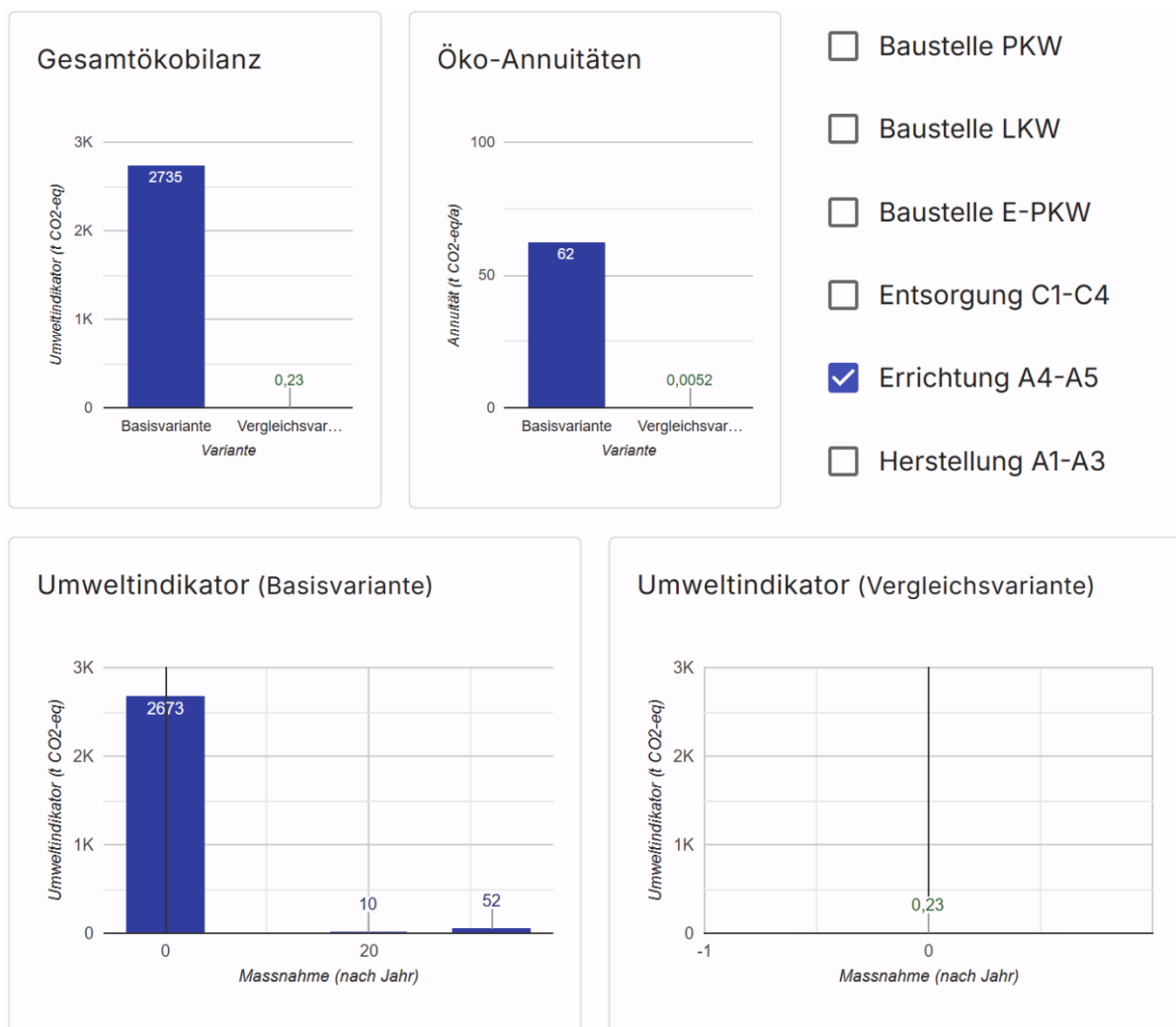


Abbildung 58: Ökologische Bewertung der *Errichtung* (Module A4 bis A5), Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner)

Auf eine Detailbetrachtung der Lebenszyklusphase der *Entsorgung* (Module C1 bis C4) wird verzichtet, da diese keine neuen Erkenntnisse liefert. Die Entsorgung verursacht ca. 20 % der Treibhausgasemissionen der direkten Umweltwirkungen.

Die Analyse dieser Teilergebnisse verdeutlicht, wo aus ökologischer Sicht Einsparungs- und Optimierungspotenziale bestehen und wo Änderungen in den Eingangswerten auch zu Änderungen in den Ergebnissen führen. Dies ist primär in der *Herstellungsphase* (Module A1 bis A3) und somit bei der Auswahl der Oberbaumaterialien und deren Bearbeitungsprozessen. Die Analyse zeigt auch, dass die technische Nutzungsdauer einen grossen Einfluss auf die Öko-Annuität hat. Durch eine angepasste Bauweise, die Verwendung langlebiger Materialien und eine anforderungsgerechte Dimensionierung des Strassenaufbaus kann die technische

Nutzungsdauer von Strassen optimiert werden. Dies reduziert die Anzahl und Intensität von baulichen Erhaltungsmassnahmen und dadurch die direkten Umweltwirkungen, sowohl in den Lebenszyklusphasen der Herstellung und Errichtung als auch in der Entsorgung.

Neben den direkten Umweltwirkungen hat der Strassenaufbau auch einen Einfluss auf den Verkehr und die damit verbundenen indirekten Umweltwirkungen. Die Abbildung 59 und die Abbildung 56 zeigen die Auswirkungen von Baumassnahmen auf den Verkehr. Sowohl in der Asphaltbauweise als auch in der Betonbauweise haben die Baumassnahmen in der Gesamtköbilanz einen positiven Effekt in Form einer Reduktion der Treibhausgasemissionen. Die Geschwindigkeitsreduktion innerhalb der Baustelle führt zu einer Reduktion des Treibstoffverbrauchs und damit zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen des Verkehrs während der Bauzeit.

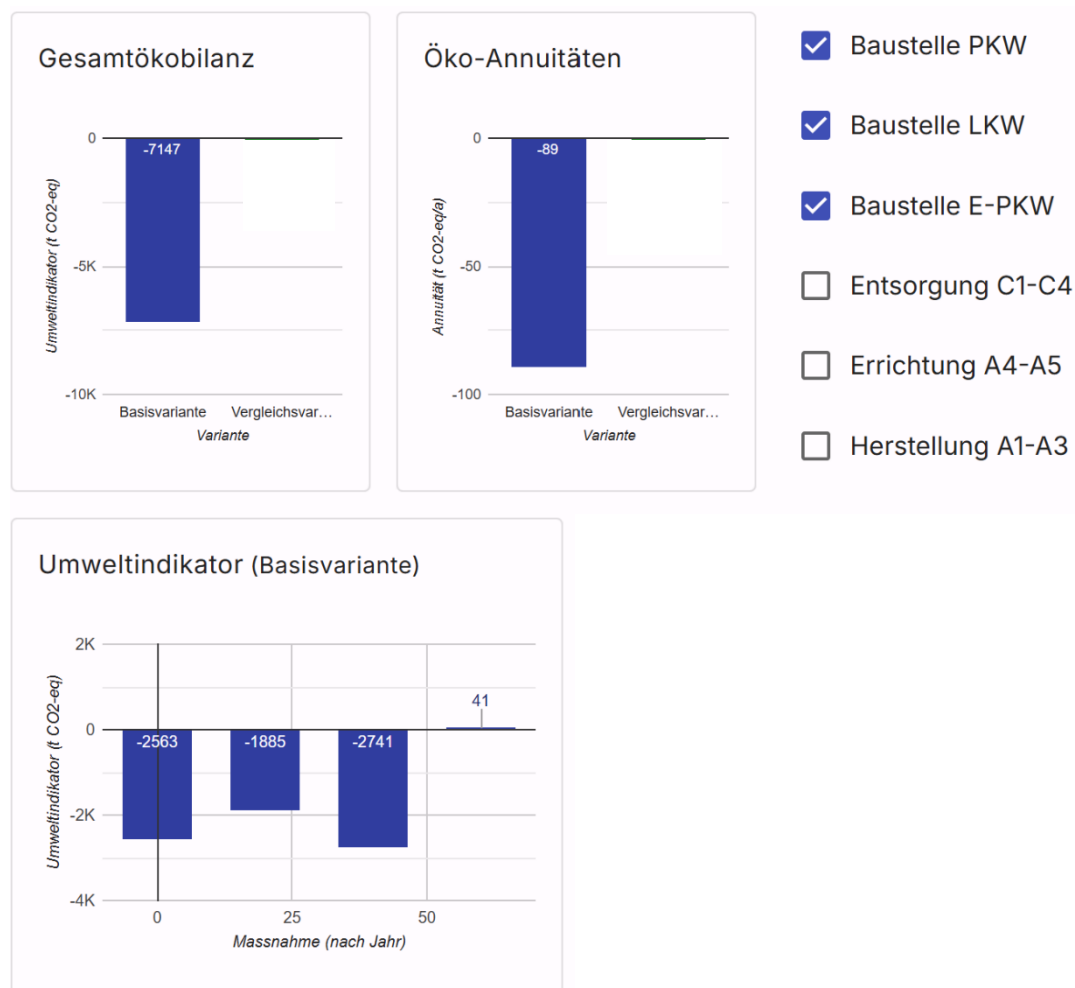


Abbildung 59: Ökologische Bewertung der Wirkung Baustelle auf Verkehr (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1 (© SABINA-Bilanzrechner)

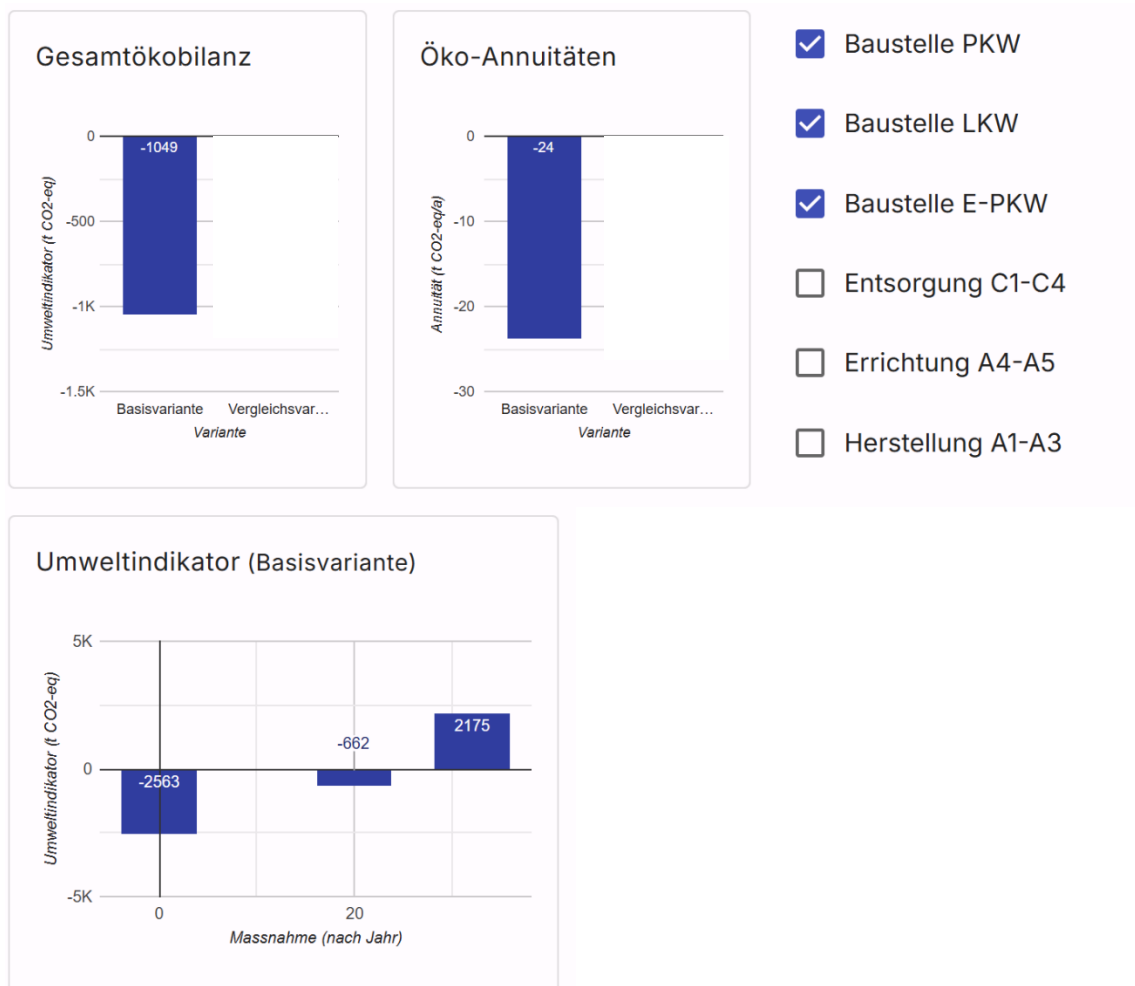


Abbildung 60: Ökologische Bewertung der Wirkung Baustelle auf Verkehr (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner)

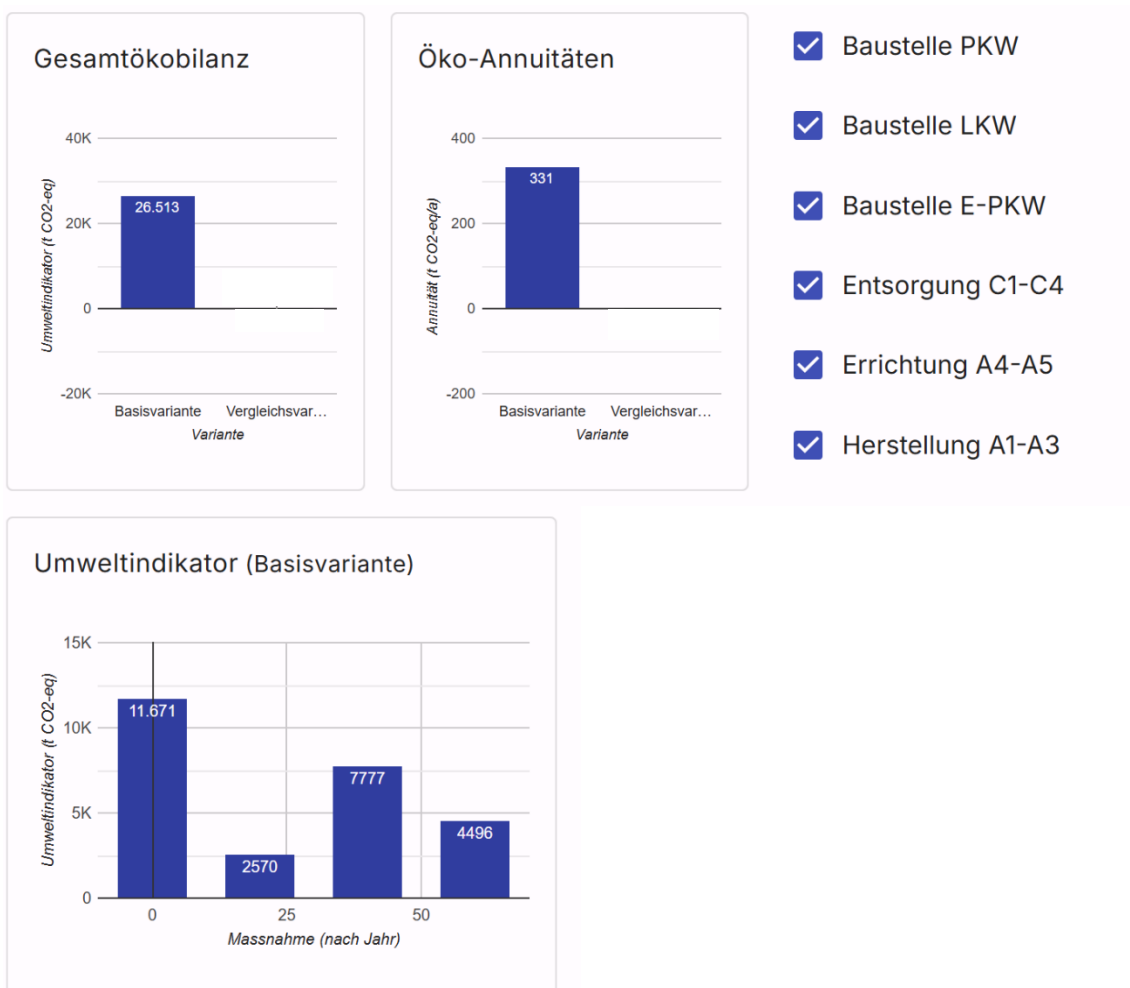
In der Asphaltbauweise resultieren während sämtlicher Baumassnahmen Einsparungen der Treibhausgasemissionen durch den Verkehr. Da der Verkehr mit reduzierter Geschwindigkeit und geringer Staubildung fließt, reduzieren sich die Umweltwirkungen durch den Verkehr. Auffallend ist, dass die strukturelle Verstärkung nach 40 Jahren die grössten Einsparungen bewirkt. Der Grund hierfür ist, dass durch die angenommene Zuwachsrate der Verkehr zwar zugenommen hat, die Baustelle jedoch genügend Verkehrskapazität aufweist, dass keine Staubildung auftritt. Die reduzierte Geschwindigkeit in Kombination mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen führt zu einer erhöhten Reduktion der Treibhausgasemissionen. In der letzten Deckschichtmassnahme nach 60 Jahren ergibt sich keine Einsparung mehr, sondern eine leichte Erhöhung der Treibhausgasemissionen. Die Verkehrskapazität der Baustelle reicht nicht mehr aus, weshalb Staubildung auftritt.

Für die Betonbauweise bringt der Neubau zu Beginn der Analyseperiode die grösste Einsparung. Die erste Instandsetzung der Betonplatten nach 20 Jahren führt nur noch zu einer vergleichsweise geringen Einsparung der Treibhausgasemissionen durch den Verkehr. Die zweite Instandsetzung der Betonplatten nach 32 Jahren führt gar zu höheren Treibhausgasemissionen durch den Verkehr. Der Grund hierfür ist, dass die Anzahl der Fahrstreifen in der Baustelle von zwei auf einen Fahrstreifen reduziert ist, wodurch die Verkehrskapazität während der Bauzeit sinkt. Hinzu kommt, dass durch die angenommene Zuwachsrates des Verkehrs ein höheres Verkehrsaufkommen herrscht. Diese beiden Faktoren führen dazu, dass es im Baustellenbereich zu erhöhter Staubbildung kommt und damit die Treibhausgasemissionen des Verkehrs zunehmen.

Die Betrachtung des Verkehrs im Baustellenbereich zeigt, dass sich in der Berechnungsvariante in Asphaltbauweise mehr Einsparungen durch den Verkehr ergeben als in der Berechnungsvariante in Betonbauweise. Der Hauptgrund hierfür liegt in der hohen Produktivität der Betonplatteninstandsetzung im Vergleich zu den baulichen Erhaltungsmassnahmen in der Asphaltbauweise. Durch eine hohe Produktivität reduziert sich Bauzeit und damit auch die Dauer der baustellenbedingten Geschwindigkeitsreduktion, welche unter der Bedingung, dass keine Staubbildung auftritt, zu einer Reduktion der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen führt.

Die Teilbetrachtung der indirekten Umweltwirkungen durch den Verkehr zeigen eindrücklich, wie wichtig die Verhinderung von Stau im Baustellenbereich ist, um eine Erhöhung der Treibhausgasemissionen zu verhindern. Die Teilbetrachtung zeigt ausserdem, welches Potenzial zur Einsparung von Umweltwirkungen in der Reduktion der Fahrtgeschwindigkeit liegt. Eine längere Bauzeit hat, unter der Bedingung, dass keine Staubbildung auftritt, einen positiven Einfluss auf die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen, da die Geschwindigkeitsreduktion länger anhält.

Werden alle Ergebnisse der ökologischen Bewertung zusammengefasst (Abbildung 61 für die Asphaltbauweise und Abbildung 62 für die Betonbauweise), ergeben sich trotz der durch die Baustelle verursachten Reduktion der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen negative Umweltauswirkungen. Die Betonbauweise weist in der Gesamtökobilanz ca. 30 % tiefere Treibhausgasemissionen auf als die Asphaltbauweise. Bei Betrachtung der Öko-Annuität weist hingegen die Asphaltbauweise ca. 30 % tiefere Treibhausgasemissionen auf. Dies ist auf die unterschiedlichen Analyseperioden zurückzuführen und erlaubt keine Aussage darüber, welche Bauweise ökologisch nachhaltiger ist.



**Abbildung 61: Ökologische Bewertung *aller Wirkungen* (alle Fahrzeugkategorien und alle Phasen), Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1
(© SABINA-Bilanzrechner)**

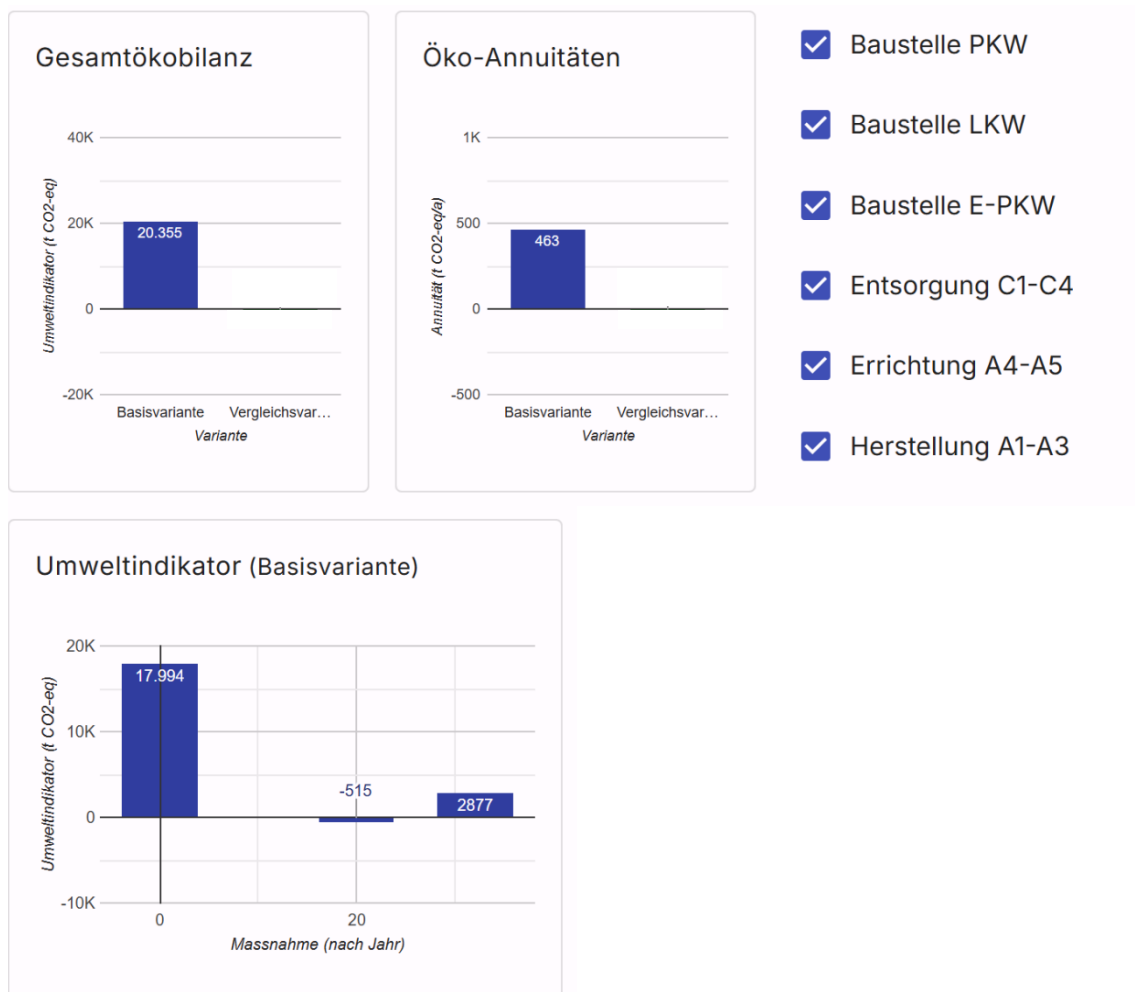


Abbildung 62: Ökologische Bewertung *aller Wirkungen* (alle Fahrzeugkategorien und alle Phasen), Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner)

8.5.2.3 Beurteilung der Langzeitwirkungen

Neben der Analyse der Baumassnahmen und ihrer Auswirkungen auf den Verkehr während der Bauzeit, ermöglicht der SABINA-Bilanzrechner auch eine Abschätzung der langfristigen Auswirkungen der Baumassnahmen auf den Verkehr. Im Vergleich zur Bewertung von Baumassnahmen unterscheiden sich hierbei die zugrunde liegenden Eingangsgrössen, da sie im Regelfall eine andere Genauigkeits- bzw. Qualitätsstufe aufweisen. Daher wird entschieden davon abgeraten, die negativen Auswirkungen aus Bau und Verkehr mit den Einsparungen aus der Langzeitwirkung gegenzurechnen, auch weil die berechneten Werte lediglich die relative Wirkung, also das mögliche Einsparungspotenzial zwischen dem *Nichts-Tun* im jeweiligen Erhaltungsintervall und der Langzeitwirkung durch die Massnahme darstellen.

Die gesamten Wirkungen des Verkehrs auf die Treibhausgasemissionen über die gesamte technische Nutzungsdauer sind in diesem Modul nicht dargestellt. Für einen relativen Vergleich ist diese Form der Ergebnisse jedoch aussagekräftig.

Die Abbildung 63 zeigt, dass die Baumassnahmen durch die Reduktion der Längsebenheit der Fahrbahn (Verbesserung des Strassenzustands) zu einer Reduktion der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen führen.

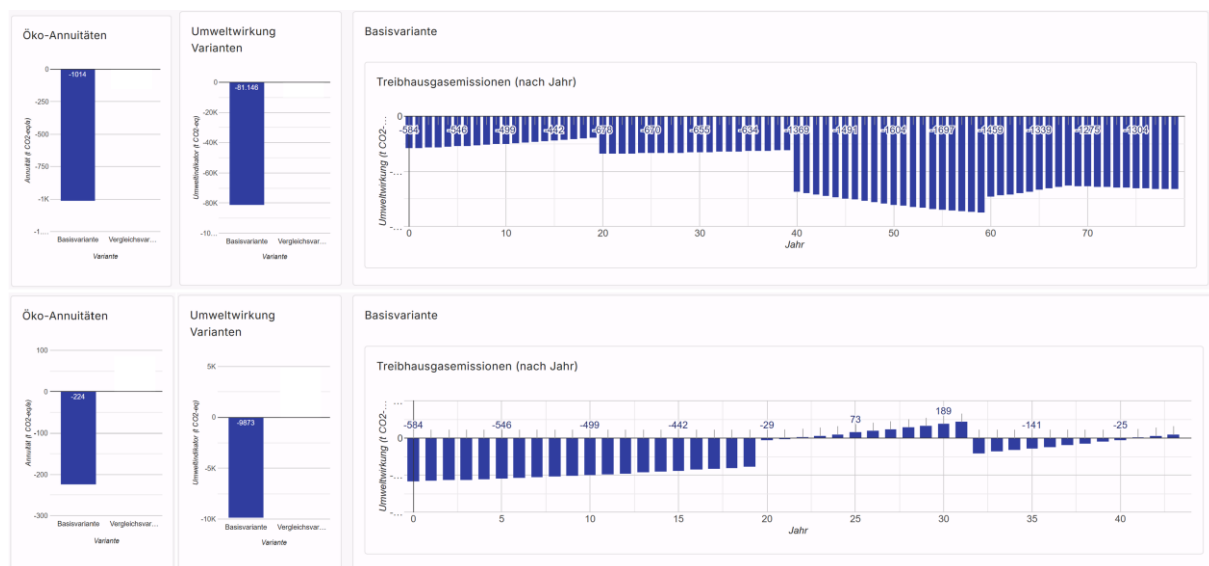


Abbildung 63: Ökologische Bewertung der Langzeitwirkungen (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Deutschland, oben Asphaltbauweise (Berechnungsvariante DE-1) und unten Betonbauweise (Berechnungsvariante DE-2) (© SABINA-Bilanzrechner)

Durch die Nutzung der Fahrbahn nimmt die Längsebenheit der Fahrbahn über den zeitlichen Verlauf wieder zu, wodurch die verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen ansteigen. Bewertet werden in diesem Zusammenhang die durch die Massnahmen im Folgeintervall quantifizierbaren Verbesserungen. Die Einsparung der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen durch die Verbesserung des Strassenzustands ist für die Asphaltbauweise höher als für die Betonbauweise. Der Grund hierfür ist, dass die Längsebenheit in der Betonbauweise etwas schlechter ist als jene der Asphaltbauweise, selbst direkt nach dem Neubau zu Beginn der Analyseperiode. Aktuelle Betondeckenerneuerungen in Österreich weisen teilweise deutlich schlechtere Längsebenheitswerte auf. Um die Auswirkungen einer geringeren Bauqualität auf die Langzeitwirkung im SABINA-Bilanzrechner abzubilden, wäre eine zusätzliche Anpassung der Betonvariante durch die Wahl alternativer Rücksetzwerte einfach möglich. Bei den baulichen Erhaltungsmassnahmen in der Asphaltbauweise kann durch den Austausch von Asphaltdeck- und -binderschicht eine signifikante Reduktion der Längsebenheit erzielt werden. Dies

wirkt sich auf den Treibstoffverbrauch des Verkehrs und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen aus. Bei der Betonplatteninstandsetzung wird nur eine geringe Reduktion der Längsebenheit erreicht, wodurch die Reduktion der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen durch die Massnahme entsprechend geringer ausfällt. Gegen Ende der Analyseperiode lässt sich, insbesondere in der Asphaltbauweise, eine Reduktion der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen beobachten, obwohl die Längsebenheit über den zeitlichen Verlauf abnimmt. Eine Teilbetrachtung der unterschiedlichen Fahrzeugkategorien zeigt, worauf diese Reduktion zurückzuführen ist.

Die Abbildung 64 zeigt die Langzeitwirkungen für die Kategorie der *Elektrofahrzeuge*. Durch die angenommene Zuwachsrate von jährlich 5 % steigt der Anteil an Elektrofahrzeugen und der Anteil an Verbrennungsmotoren sinkt, wodurch sich eine Reduktion der verkehrsbedingten Treibhausgasemissionen ergibt. Dies ist insbesondere in der Asphaltbauweise gut zu beobachten (oberer Teil in Abbildung 64).

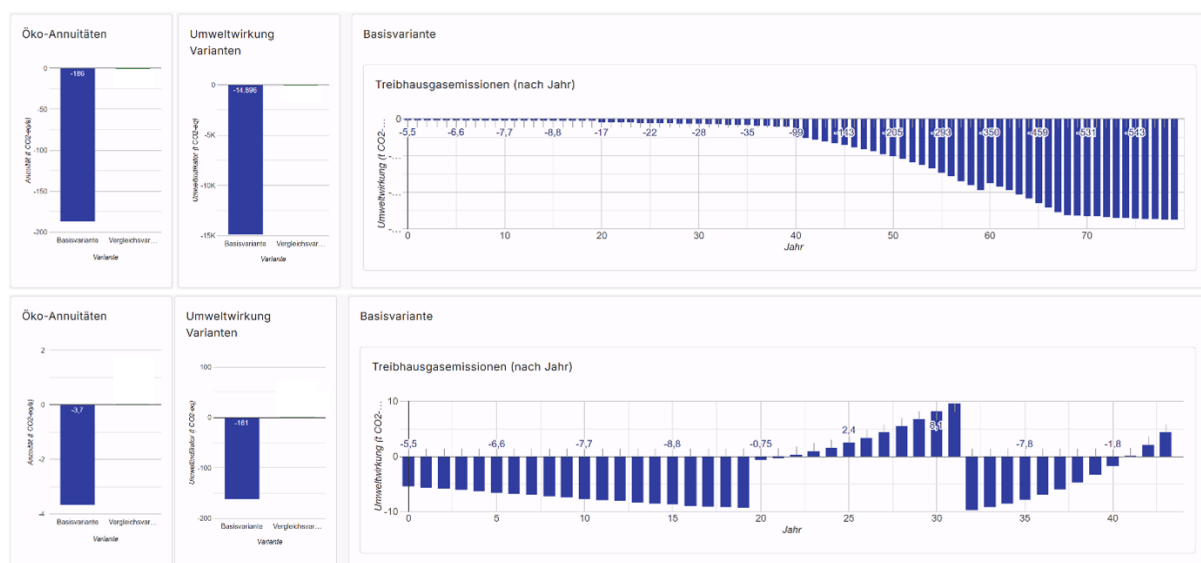


Abbildung 64: Ökologische Bewertung der *Langzeitwirkungen* (Fahrzeugkategorie E-PKW), Bsp. Deutschland, oben Asphaltbauweise (Berechnungsvariante DE-1) und unten Betonbauweise (Berechnungsvariante DE-2) (© SABINA-Bilanzrechner)

Anhand der Ergebnisse kann das grösste Einsparungs- und Optimierungspotenzial bei den Langzeitwirkungen mit der Qualität der Ausführung, im speziellen mit der Längsebenheit der Strasse verknüpft werden. Wird eine gute Ebenheit durch eine Massnahme erzielt, ergibt sich ein geringerer Energie- und Treibstoffverbrauch und somit geringere Treibhausgasemissionen im anschliessendem Erhaltungsintervall im Vergleich zum Fall des *Nichts-Tuns*, sofern nicht die Ebenheit rasch wieder schlechter wird.

9 EMPFEHLUNGEN UND BEST PRACTICE KATALOG

9.1 Allgemeines

Basierend auf den zuvor vorgestellten und analysierten Berechnungsvarianten und den daraus identifizierten Optimierungspotenzialen ist es möglich, notwendige Empfehlungen abzugeben und einen *Best Practice Katalog* mit entsprechenden Hinweisen für die nachhaltige Gestaltung von Strassenbefestigungen zu geben.

Auf die Untersuchung weiterer Berechnungsvarianten wurde verzichtet, da die identifizierten Optimierungspotenziale allgemein gültig und nicht an ein Land gebunden sind. Es können Wechselwirkungen zwischen den untersuchten Optimierungspotenzialen auftreten, weshalb eine vollständige Umsetzung sämtlicher, im vorliegenden Kapitel identifizierten Optimierungspotenziale nicht gewährleistet werden kann. Es ist aber wesentlich, die massgebenden Einflussgrössen und sensitiven Parameter mit den entsprechenden Auswirkungen auf der Grundlage der bisher mit dem SABINA-Bilanzrechner gesammelten Erfahrungen zusammenzustellen.

9.2 Grenzen und Unsicherheiten des SABINA-Bilanzrechners

Der SABINA-Bilanzrechner stellt ein leistungsfähiges Werkzeug zur ökonomischen, ökologischen und in Teilbereichen auch der sozio-ökologischen Bewertung von Strassenbauweisen über den gesamten Lebenszyklus bzw. die technische Nutzungsdauer dar. Dennoch unterliegt seine Anwendung verschiedenen Grenzen und Unsicherheiten, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

9.2.1 Modellgrenzen und methodische Annahmen

Der SABINA Bilanzrechner basiert auf standardisierten Modellen, normativen Annahmen und vereinfachten Abbildungen komplexer Realprozesse. In der aktuellen Ausbaustufe des SABINA-Bilanzrechners ist beispielsweise die technische Nutzungsdauer projektspezifisch festgelegt, wodurch Varianten mit unterschiedlichen Nutzungsdauern nicht innerhalb eines Projekts direkt vergleichbar sind. Abweichungen können lediglich über den Vergleich eigenständig durchgerechneter Projekte berücksichtigt werden. Diese Vereinfachung kann insbesondere in frühen Planungsphasen zu Unsicherheiten führen, wenn Bauweisen mit unterschiedlichen technischen Nutzungsdauern gegenübergestellt werden (siehe hierzu auch Kapitel 9.2.3).

Zudem basieren die Eingangswerte, wie z. B. Materialkennwerte, Massnahmenkosten, Emissionswerte oder Verkehrsdaten, auf allgemeinen Erfahrungswerten oder nationalen Durchschnittsdaten. Die Eingangsdaten für die Modellierung können zwar durch die Anwenderin über die Weboberfläche angepasst werden, jedoch können lokale Besonderheiten derzeit nicht über die Weboberfläche geändert werden, wie z. B. nicht-lineare Zustandsprognosemodelle der Längsebenheit, nicht-lineare Funktionen zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Längsebenheit und Treibstoffverbrauch oder unterschiedliche Geschwindigkeitskategorien für Treibstoff- und Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Fahrzeugkategorie.

9.2.2 Unsicherheiten in den Eingangsdaten

Ein wesentlicher Unsicherheitsfaktor liegt in der Qualität und Genauigkeit der Eingangsdaten. Insbesondere bei der ökologischen Bewertung können beispielsweise geringe Abweichungen in den Emissionsfaktoren der eingesetzten Materialien oder in den Annahmen zum Energieverbrauch der Bauprozesse deutliche Unterschiede in den Ergebnissen verursachen. Auch die Angaben zu Erhaltungsintervallen und deren Intensität beruhen häufig auf Erfahrungswerten und sind daher mit einer gewissen Streuung behaftet.

Darüber hinaus zeigen die Sensitivitätsanalysen, dass sich Änderungen einzelner Parameter wie z. B. der Materialwahl, der Baustellendauer oder der Produktivität, unmittelbar auf die ökonomischen und ökologischen Ergebnisse auswirken. Anwenderinnen sollten daher stets im Rahmen von Sensitivitätsanalysen prüfen, in welchem Mass die gewählten Eingangsgrössen die Resultate beeinflussen.

9.2.3 Begrenzung des Analysezeitraums, Grenzen der Vergleichbarkeit

Der SABINA-Bilanzrechner ermöglicht eine vollständige und unabhängige Auswertung eigenständiger Projekte. Sämtliche Berechnungsergebnisse stehen somit projektspezifisch im vollen Umfang zur Verfügung.

Bei Varianten mit deutlich voneinander abweichenden technischen Nutzungsdauern und der damit verbundenen Anwendung unterschiedlicher Lebenszyklusmodelle (z. B. ein vollständiger Lebenszyklus bei Variante A versus zwei vollständige Lebenszyklen bei Variante B) besteht eine eingeschränkte Vergleichbarkeit der ökonomischen Annuitäten. Ursache dafür ist die zugrunde liegende Kapitalwertmethode, nach der die zukünftigen Kosten und Massnahmen mittels Abzinsung (Diskontierung) auf den Betrachtungszeitpunkt bezogen werden. Da der Kapitalwert künftiger Massnahmen mit zunehmendem zeitlichem Abstand abnimmt, zeigt

sich bei der Annuität, welche die über den Lebenszyklus verteilten Kosten repräsentiert, eine degressive Entwicklung. Je länger die Analyseperiode und je stärker die Massnahmen in der Zukunft liegen, desto stärker wirkt dieser Effekt.

Im Gegensatz dazu wird bei der ökologischen Annuität keine Abzinsung vorgenommen. Die Umweltwirkungen (z. B. GWP) werden über den gesamten Lebenszyklus linear summiert und nicht zeitlich gewichtet. Der beschriebene Diskontierungseffekt betrifft daher ausschliesslich die ökonomische Bewertung.

Grundsätzlich ist es mit dem SABINA-Bilanzrechner möglich und auch methodisch sinnvoll, Varianten mit unterschiedlichen technischen Nutzungsdauern zu vergleichen. Um eine methodisch konsistente und vergleichbare Bewertung zu gewährleisten, sollte die Anzahl der vollständigen Lebenszyklen identisch sein. Nur wenn beide Varianten über gleich viele abgeschlossene Lebenszyklen betrachtet werden, lassen sich die resultierenden ökonomischen und ökologischen Kennwerte sinnvoll gegenüberstellen.

9.2.4 Abbildung von Verkehrs- und Baustellenwirkungen

Ein besonderes Augenmerk gilt den Umweltauswirkungen durch Verkehrsbeeinträchtigungen während Bau- und Erhaltungsmassnahmen. Der SABINA-Bilanzrechner bildet zwar die Stau- und Emissionseffekte während der Bauzeit ab, jedoch werden derzeit nur begrenzte Annahmen zu Umleitungsverkehren berücksichtigt. Weitere negative Wirkungen, etwa durch längere Umleitungstrecken oder zusätzliche Emissionen im Sekundärverkehr, werden in der aktuellen Ausbaustufe des SABINA-Bilanzrechners nicht modelliert. Dadurch kann das tatsächliche ökologische Gesamtergebnis unterschätzt oder überschätzt werden.

9.3 Verwendung möglichst nachhaltiger Strassenbaumaterialien

Die Auswahl von Strassenbaumaterialien unterliegt im Strassenbau hohen technischen Anforderungen sowie normativen und sicherheitsrelevanten Vorgaben. Dennoch besteht innerhalb dieser Rahmenbedingungen ein bedeutender Handlungsspielraum zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit von Strassenbaustoffen und -bauweisen. Die gezielte Auswahl und Kombination geeigneter Baustoffe und/oder Bauweisen kann den ökologischen Fussabdruck eines Strassenoberbaus erheblich reduzieren, wenn dabei nicht die technische Nutzungsdauer oder Dauerhaftigkeit herabgesetzt wird.

Die Nachhaltigkeit eines Baustoffs wird dabei nicht nur durch seine Zusammensetzung, son-

dern auch durch die Herstellungsprozesse, die Energiequellen in der Produktion und die erzielte Nutzungsdauer des Bauwerks bestimmt. Insbesondere im Bereich des Asphalt- und Betonstrassenbaus können durch eine optimierte Materialwahl und ressourcenschonende Produktionsverfahren erhebliche Beiträge zur Reduktion der Treibhausgasemissionen und des Primärenergieverbrauchs erzielt werden.

Die wesentlichen Best-Practice-Empfehlungen im Bereich nachhaltiger Strassenbaumaterialien werden wie folgt zusammengefasst:

- **Ganzheitliche Bewertung der Nachhaltigkeit von Baustoffen**
 - Nachhaltigkeit ist über den gesamten Lebenszyklus zu bewerten, von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, den Einbau und Nutzung bis zur Wiederverwendung.
 - Baustoff-Entscheidungen sind in ökologische, technische und ökonomische Gesamtbewertungen einzubetten.
 - Lokale Verfügbarkeit, Transportwege und Recyclingfähigkeit sind in die Entscheidungsfindung einzubeziehen.
- **Massgebende Nachhaltigkeitskriterien für die Asphaltbauweise**
 - Lange technische Nutzungsdauer: Eine vorausschauende Instandhaltung (z. B. Risse vergiessen) verlängert die technische Nutzungsdauer und führt zu einer deutlichen Reduktion der Umweltwirkungen pro Nutzungsjahr.
 - Optimiertes Mix Design: Die Zusammensetzung des Asphaltmischguts (Bindemittelgehalt, RC-Anteil, Additive) ist an die zu erwartenden klimatischen und verkehrlichen Belastungen anzupassen.
 - Reduzierter Bindemittelgehalt: Ein geringerer Bitumenanteil senkt den Energiebedarf und die CO₂-Emissionen bei der Herstellung. In der Praxis wird der Bindemittelgehalt in Deutschland eher etwas zu hoch gewählt, sodass nicht die grösstmögliche Standfestigkeit der Asphaltschicht gewährleistet ist. Umgekehrt kann eine zu starke Reduktion des Bindemittelgehalts die Lebensdauer verkürzen und so den ökologischen Vorteil wieder aufheben.

- Hoher Anteil an Recyclingmaterial: Der Einsatz sekundärer Gesteinskörnungen (z. B. Asphaltgranulat) reduziert den Bedarf an Primärrohstoffen und Depo-nievolumen. Der maximal mögliche Anteil an Recyclingmaterial hängt wesentlich von der alterungsbedingten Verhärtung des Asphaltgranulats, der Technologie zur Bitumenregeneration (Verjüngung) durch geeignete Additive und von der technischen Ausstattung der Asphaltmischanlage ab. Paralleltrommelanlagen ermöglichen höhere Recyclinggehalte als einfache Trockentrommelanlagen, da sie eine getrennte Erhitzung von Frisch- und Recyclingmaterial erlauben.
- Nachhaltige Wärmequelle und Strommix: Der Einsatz klimafreundlicher Energiequellen (z. B. Holzstaub, Biogas) in Asphaltmischanlagen reduziert die prozessbedingten Emissionen. Die Ausstattung der Asphaltmischanlage kann somit ein entscheidender Faktor für die ökologische Optimierung einer Massnahme sein. Der Anteil erneuerbarer Energien im Produktionsstrom senkt zusätzliche Emissionen, wenngleich in geringerem Ausmass als die Wärmequelle.
- **Massgebende Nachhaltigkeitskriterien für die Betonbauweise**
 - Lange technische Nutzungsdauer: Eine vorausschauende Instandhaltung (z. B. Fugenpflege) verlängert die technische Nutzungsdauer und führt zu einer deutlichen Reduktion der Umweltwirkungen pro Nutzungsjahr.
 - Reduzierter Bindemittelgehalt: Ein geringerer Zementanteil führt zu geringeren CO₂-Emissionen.
 - Nachhaltiges Bindemittel: Der Einsatz klinkerreduzierter Zemente oder alternativer Bindemittel (z. B. CEM II/CEM III) senkt das GWP signifikant.
 - Nachhaltige Wärmequelle bei der Klinkerherstellung: Der Einsatz erneuerbarer Brennstoffe (z. B. Biomasse, Ersatzbrennstoffe) reduziert prozessbedingte Emissionen.

9.4 Verwendung nachhaltiger Baumaschinen und Transportmittel

Neben der Wahl des Baumaterials haben auch die Materialtransporte sowie die Ein- und Ausbauprozesse einen wesentlichen Einfluss auf die Nachhaltigkeit. Durch die Wahl von nachhaltigen Antriebstechnologien für Transportmittel und Baumaschinen können die Umweltwirkungen des Strassenbaus reduziert werden.

Die Wahl der eingesetzten Transportmittel und Baumaschinen hat keinen Einfluss auf die Qualität des Strassenbaus und liegt in der Kompetenz der Auftraggeberinnen von Strassenbauprojekten. Derzeit finden unterschiedliche Pilotprojekte statt, in welchen die Verwendung elektrifizierter Baumaschinen untersucht wird.

9.5 Optimierung der Lebenszyklen und Erhaltungsintervalle

Die ökonomische und ökologische Bewertung von Oberbaukonstruktionen über den gesamten Lebenszyklus hinweg stellt eine zentrale Grundlage für nachhaltige und somit tragfähige Entscheidungen dar. Dabei ist es keinesfalls ausreichend, ausschliesslich die anfänglichen Investitionskosten zu betrachten. Es müssen sämtliche Erhaltungsmassnahmen, deren Intervalle sowie die technische Nutzungsdauer der eingesetzten Materialien und die Qualität der Bauausführungen berücksichtigt werden. Ziel einer ganzheitlichen Betrachtung ist es, Einsparpotenziale zu identifizieren, ohne dabei die Qualität oder Dauerhaftigkeit des Oberbaus zu reduzieren. Der Schlüssel liegt in der Analyse von Kosten (ökonomische Wirkungen), den umweltrelevanten Wirkungen und der technischen Nutzungsdauer. Sowohl die monetäre Annuität als auch die Öko-Annuität dienen als massgebliche Kennzahlen für eine Nachhaltigkeitsbewertung.

Ein erhebliches Optimierungs- und Einsparpotenzial ergibt sich durch die gezielte Verlängerung von Erhaltungsintervallen, sofern die am Ende dieser Intervalle erforderlichen Massnahmen nicht in einem überproportionalen Umfang intensiver ausfallen. Die Realisierung solcher Optimierungen setzt im Regelfall den Einsatz von Materialien höherer Dauerhaftigkeit, eine Bauausführung oberhalb der normativen Mindestanforderungen und / oder eine Dimensionierung des Oberbaus mit erhöhten Belastungsreserven voraus (z. B. Wahl der nächsthöheren Lastklasse im Rahmen der Oberbaudimensionierung). Diese Massnahmen führen zwar häufig zu erhöhten Anfangsinvestitionen, können jedoch über den gesamten Betrachtungszeitraum zu einer Reduktion der durchschnittlichen jährlichen ökonomischen und ökologischen Wirkungen (Annuitäten) beitragen.

Die wesentlichen Best-Practice-Empfehlungen zur Optimierung von Lebenszyklen und Erhaltungsintervallen werden wie folgt zusammengefasst:

- **Systematische und integrative Lebenszyklusplanung**
 - Lebenszyklusmodelle sind bereits in der frühen Planungsphase zu entwickeln und an projektspezifische Randbedingungen anzupassen.
 - Die Wechselwirkungen zwischen Materialwahl, Bauweise, Beanspruchung und Nutzung sind explizit zu berücksichtigen.
 - Lebensdauer-Annahmen sind regelmässig anhand empirischer Zustandsdaten und Erfahrungswerte zu validieren.
- **Fundierte Ermittlung und Fortschreibung von Massnahmenkosten**
 - Kostenschätzungen sollten auf verifizierten Datenquellen, Normkostenansätzen und projektbezogenen Erfahrungswerten basieren. Unsicherheiten in der Kostenentwicklung sind mittels Sensitivitäts- oder probabilistischer Analysen zu quantifizieren.
 - Eine kontinuierliche Fortschreibung der Kosteninformationen gewährleistet die Aktualität der Bewertungsgrundlagen.
- **Optimierung und Validierung von Erhaltungsintervallen**
 - Erhaltungsintervalle sind so zu gestalten, dass ein optimales Verhältnis zwischen Erhaltungsaufwand, Bauwerkszustand und Nutzungsdauer erzielt wird.
 - Die Verlängerung von Erhaltungsintervallen ist nur dann anzustreben, wenn die Massnahmenintensität am Intervall-Ende keine überproportionale Kostensteigerung verursacht.
 - Prognosemodelle zur Zustandsentwicklung sind zur objektiven Bestimmung der Intervall-Dauer einzusetzen.
- **Qualitätsorientierte Baustoffwahl und Bauausführung**
 - Der Einsatz hochwertiger und dauerhafter Baustoffe ist insbesondere dann wirtschaftlich vorteilhaft, wenn dadurch signifikante Lebensdauerverlängerungen erzielt werden.

- Eine qualitätsgesicherte Bauausführung oberhalb der normativen Mindestanforderungen kann wesentlich zur Minimierung frühzeitiger Substanzverluste beitragen.
- Konstruktive Überdimensionierungen sind im Hinblick auf ihre potenzielle Reduktion der Erhaltungsfrequenz wirtschaftlich zu bewerten.

9.6 Ausführungsqualität von Erhaltungsmassnahmen

Die Qualität der Bauausführung stellt eine entscheidende Einflussgrösse für die ökonomische und ökologische Wirkung von Erhaltungsmassnahmen im Lebenszyklus dar.

Neben der Wahl geeigneter Baustoffe und Bauverfahren ist insbesondere die erzielte Längsebenheit der Fahrbahn von zentraler Bedeutung für die langfristige Funktionalität und Umweltwirkung einer Massnahme. Die Analysen in diesem Projekt verdeutlichen, dass eine hohe Ebenheit unmittelbar zu einem geringeren Rollwiderstand führt und dadurch den Energie- und Treibstoffverbrauch des fliessenden Verkehrs signifikant reduziert. Daraus resultieren z. B. geringere Treibhausgasemissionen über das nachfolgende Erhaltungsintervall hinweg. Dieses Einsparungspotenzial ergibt sich aber nur, wenn die erreichte Ebenheit über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden kann. Eine unzureichende Dauerhaftigkeit der Oberfläche oder frühzeitige Verformungen können die positiven Effekte innerhalb kurzer Zeit wieder aufheben. Somit besteht das grösste Optimierungs- und Einsparpotenzial in der Verbesserung der Ausführungsqualität, insbesondere hinsichtlich der Dauerhaftigkeit einer hohen Längsebenheit. Zielwerte für die Ebenheit können projektspezifisch definiert und über normative Mindestanforderungen hinaus festgelegt werden, sofern dies technisch und wirtschaftlich vertretbar ist.

9.7 Verkehrsführung und Gestaltung von Baustellen

Baustellenbedingte Verkehrseinschränkungen haben einen bedeutenden Einfluss auf die Umweltwirkungen von Erhaltungsmassnahmen. Insbesondere die durch reduzierte Leistungsfähigkeit und Stau entstehenden zusätzlichen Treibhausgasemissionen können einen erheblichen Anteil an den indirekten Umweltwirkungen eines Bauprojekts ausmachen. Die Höhe dieser Emissionen hängt massgeblich von der Verkehrsbelastung, der Gestaltung der Baustelle, der temporären Leistungsfähigkeit des betroffenen Abschnitts und der Gesamtdauer der Massnahme ab.

Die Dauer wiederum wird durch die gewählte Bauweise, die Produktivität der eingesetzten

Verfahren und die Zeit für Einrichtung und Abbau der Baustelle bestimmt. Aus dieser Kausalität ergibt sich, dass das wesentliche Einsparungs- und Optimierungspotenzial in der effizienten Baustellenorganisation sowie der minimierten Bauzeit liegt. Eine Reduktion der Verkehrsbelastung selbst kann lediglich durch Verkehrslenkungsmassnahmen wie Umleitungen oder Zeitverschiebungen erzielt werden, deren ökologische Folgewirkungen bislang in gängigen Bilanzierungsmodellen nicht berücksichtigt sind (auch nicht im SABINA-Bilanzrechner).

Die wesentlichen Best-Practice-Empfehlungen zur Verkehrsführung und Gestaltung der Baustellen werden dabei wie folgt zusammengefasst:

- **Integrierte Planung von Bauablauf und Verkehrsführung**
 - Baustellenkonzepte sind frühzeitig unter Einbeziehung von Verkehrsdaten, Prognosen und Leistungsfähigkeitsanalysen zu entwickeln.
 - Die Wechselwirkungen zwischen Bauphasenplanung, Verkehrsfluss und Umweltwirkungen sind systematisch zu analysieren.
 - Bauzeitverkürzungen durch parallele Arbeitsprozesse oder modulare Bauweisen sind prioritär zu prüfen.
- **Effiziente Gestaltung der Baustellenorganisation**
 - Baustelleneinrichtung und Materiallogistik sind so zu planen, dass Stillstandszeiten und innerbetriebliche Transporte minimiert werden.
 - Optimierte Bauphasen mit klar definierten Arbeitsschritten und hoher Prozesskontinuität tragen zur Reduktion der Massnahmendauer bei (Stichwort *Digitale Baustelle*).
 - Mobile oder temporäre Bauverfahren (z. B. Vorfertigung, Wochenend-, Feiertags- und Nachtarbeit) sind nach Möglichkeit zu berücksichtigen, sofern sie eine Verringerung der Verkehrsbeeinträchtigung ermöglichen.
- **Verkehrsflussoptimierung während der Bauphase**
 - Baustellenverkehrsführungen sind so zu gestalten, dass Engstellen minimiert und Kapazitätsverluste begrenzt werden.
 - Temporäre Fahrstreifenverschiebungen, flexible Spurbreiten und adaptive Verkehrssteuerungssysteme können die Leistungsfähigkeit signifikant verbessern.

- Regelmässige Leistungsfähigkeitsanalysen während der Bauphase dienen der kurzfristigen Anpassung der Verkehrsführung.
- **Minimierung der Massnahmendauer**
 - Der Einsatz hochproduktiver Bauverfahren und optimierter Baugeräte kann zur Verkürzung der Bauzeit beitragen.
 - Einrichtung und Abbau der Baustelle sind durch standardisierte Abläufe und koordinierte Logistik zu beschleunigen.
 - Digitalisierung und Echtzeit-Bauprozessüberwachung (z. B. durch Baufortschritts-Tracking) erhöhen die Umsetzungs- und Reaktionsgeschwindigkeit.

10 ZUSAMMENFASSUNG

10.1 Zielsetzung, Vorgehensweise und Grundlagen

Das Forschungsprojekt SABINA Strassenbauweisen Bilanzierung Nachhaltigkeit wurde als gemeinsames Forschungsprojekt Projekt der D-A-CH-Länder (Deutschland, Österreich und Schweiz) initiiert mit dem Ziel, die Lebenszyklusanalyse als Instrument der Entscheidungsfindung im Planungs- und Ausschreibungsprozess von Strassenbauprojekten zu etablieren. Es sollte eine Methodik entwickelt werden, um entsprechend dem Stand der Wissenschaft die Ökobilanzierung von Strassen unter der Berücksichtigung aller relevanten Aspekte der Nachhaltigkeit durchzuführen. Als Projektergebnis sollte in den D-A-CH-Ländern ein einheitliches Werkzeug für nachhaltige Planungs- und Entscheidungsprozesse im Strassenbau geschaffen sein, das die objektiven Zusammenhänge von technischen Parametern und deren Umweltwirkungen sichtbar macht und nachvollziehbar quantifiziert.

Während des Projekts wurde der SABINA-Bilanzrechner erarbeitet, eine Software, die eine auf wissenschaftlich fundierten Modellen basierende und in der Praxis anwendungsgerechte Nachhaltigkeitsbewertung von (Hochleistungs)Strassen ermöglicht. Mittels des SABINA-Bilanzrechners können verschiedene Strassenoberbau-Varianten hinsichtlich ihrer technischen, ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit über den gesamten Lebenszyklus hinweg verglichen werden. Jede Strassenoberbau-Variante wird anhand von allgemein anerkannten Kennzahlen der Nachhaltigkeit im Hinblick auf die Lebenszyklusphasen Materialgewinnung, Herstellung, Errichtung, Nutzung, Erhaltung, Rückbau und Wiederverwendung bzw. Entsorgung bewertet.

Methodische Grundlagen hierfür sind einerseits die auf Umweltindikatoren basierende Lebenszyklus-Umweltanalyse (Ökobilanzierung, Life Cycle Assessment, LCA) gemäss den internationalen Normen ISO 14040 und 44 sowie den europäischen Normen EN 15804 und EN 15643, und andererseits eine Lebenszyklus-Kostenanalyse zur ökonomischen Beurteilung auf Basis der Kapitalwertmethode. Folgende Umweltindikatoren werden im SABINA-Bilanzrechner berücksichtigt:

- Kennzahlen der Lebenszyklus-Umweltanalyse sind die Treibhausgasemissionen (GWP), der kumulierte Energieaufwand (KEA), Umweltbelastungspunkte (UBP) und der Environmental Footprint (EF 3.1).
- Für die Lebenszyklus-Kostenanalyse kommen Lebenszykluskostenmodelle (LCC) und

die Kapitalwertmethode mit der monetären Annuität zur Anwendung.

- Die sozio-ökologische Verträglichkeit bezieht sich auf Nutzerinnenwirkungen wie Verkehrsbeeinträchtigung während Bau- und Erhaltungsmaßnahmen und die daraus resultierenden direkten Umweltwirkungen wie Energieverbrauch, Emissionen und Verkehrssicherheit (Unfallgeschehen) sowie die langfristigen relativen Umweltwirkungen durch Erhaltungsmaßnahmen als Folge eines verbesserten Strassenzustands.

Die Berechnungen stützen sich auf umfangreiche Material- und Prozessdaten zu allen relevanten Stoff- und Energieströmen, Emissionen sowie Maschinen- und Baugeräteeinsätzen aus den nationalen Öko-Datenbanken Ecoinvent (Deutschland, Österreich) und UVEK (Schweiz).

Der SABINA-Bilanzrechner integriert diese Daten in eine anwendungsfreundliche Anwendung, die eine intuitive Eingabe und Auswertung ermöglicht. Standardisierte Systemgrenzen gewährleisten die Einheitlichkeit der Auswertung.

10.2 SABINA-Bilanzrechner: Optimierungs- und Einsparungspotenziale anhand von Beispielrechnungen

Der Schlussbericht enthält ausführlich erläuterte, länderspezifische Berechnungsbeispiele zum SABINA-Bilanzrechner (Beispiel Schweiz, Beispiel Österreich, Beispiel Deutschland). Diese demonstrieren die Funktionsweise und die Potenziale des SABINA-Bilanzrechners. Es wird nachgewiesen, dass die Zusammensetzung der Strassenbaustoffe (aus wiederverwendeten Materialien), energieeffiziente Bauprozesse, die Dauerhaftigkeit von Strassenschichten und Erhaltungsmaßnahmen, die optimale Wahl von Erhaltungsintervallen sowie eine nachhaltige Baustellenführung die sensitivsten Einflussgrößen für die Bilanz der Nachhaltigkeit von Strassenbaumassnahmen sind. Anhand einer vergleichenden Analyse des Lebenszyklus von Strassenoberbau-Varianten werden mögliche Einsparungs- und Optimierungspotenziale aufgezeigt. Einmal ergibt sich ein klarer Unterschied in der Umwelt- und Kosteneffizienz zweier Strassenoberbau-Varianten (siehe Beispiele Deutschland und Schweiz), im anderen Fall beispielsweise beim Vergleich Asphalt- und Betonbauweise (siehe Beispiel Österreich) ist keine der beiden Varianten eindeutig nachhaltiger. Der SABINA-Bilanzrechner ermöglicht es, diese Potenziale zu erfassen, anhand von allgemein anerkannten Kennzahlen zu bewerten und transparent für den Entscheidungsprozess zu kommunizieren.

Aus den Beispielrechnungen wurden praxisorientierte Empfehlungen abgeleitet, die als

Grundlage für zukünftige Planungs- und Entscheidungsprozesse dienen können. Dazu zählen insbesondere:

- Der Einsatz möglichst nachhaltiger Baustoffe (z. B. Asphalte mit Asphaltgranulatanteilen, CO₂-reduzierte Zemente).
- Die Verwendung energieeffizienter Baumaschinen und Transportmittel.
- Die Optimierung der Lebenszyklen und Erhaltungsintervalle.
- Die Sicherstellung einer hohen Ausführungsqualität bei Erhaltungsmaßnahmen.
- Verkehrsführungen, die Umwelt- und Sicherheitsaspekte bestmöglich berücksichtigen.
- Die Einbindung sozialer Faktoren (Emissionen, Sicherheit) in die technische Bewertung.

10.3 Form des SABINA-Bilanzrechners und Implementierung

Der SABINA-Bilanzrechner ist als webbasierte Anwendung (Online-Anwendung) umgesetzt. Das bedeutet, dass das Anwendungsprogramm auf einem Webserver ausgeführt wird. Der Webserver kommuniziert als Onlinedienst im World Wide Web mit dem lokalen Gerät der Anwenderin, führt die Datenverarbeitung durch und sendet die Ergebnisse zurück an die Anwenderin. Die Vorteile der Webanwendung liegen darin, dass das Programm nicht auf dem Gerät der Anwenderin installiert ist, kein spezielles Betriebssystem erfordert und zentral gesteuert stets auf dem letzten Stand gehalten werden kann (Programm-Updates).

Der SABINA-Bilanzrechner weist eine modulare Struktur auf und bietet dadurch eine hohe Flexibilität für Programmänderungen und mögliche zukünftige Erweiterungen. Die Module kommunizieren über eine gemeinsame Datenbankstruktur, in der alle relevanten Baustoff-, Prozess- und Umweltdaten abgelegt sind. Die Integration der Daten erfolgt über eine interne Datenbank, in die die erforderlichen Werte aus den nationalen Öko-Datenbanken wie Ecoinvent (Deutschland und Österreich) und UVEK (Schweiz) übernommen werden. Diese Werte werden manuell aus den Öko-Datenbanken entnommen und in die SABINA-Datenbank eingepflegt, wodurch sichergestellt wird, dass geprüfte und verifizierte Daten (z. B. für Emissionen, Energieaufwand und Materialeigenschaften) verwendet werden. Eine automatische Aktualisierung der Daten erfolgt dabei nicht.

Besonderes Augenmerk in der Anwendung des SABINA-Bilanzrechners in der Praxis liegt im kritischen Vergleich unterschiedlicher Strassenoberbau-Varianten. So können unterschiedliche Bauweisen, beispielsweise Asphalt versus Beton, unter identischen Randbedingungen

übersichtlich gegenübergestellt und bewertet werden.

Die Grundlage für alle Analysen sind die jeweiligen nationalen Richtlinien zur Beschreibung des Strassenoberbaus und der eingesetzten Oberbaumaterialien in den D-A-CH-Ländern. Für jede im Rahmen eines Projekts definierte Variante (Basisvariante und Vergleichsvariante) werden die ökologischen und ökonomischen Kennwerte berechnet und in einem Ergebnisbericht anhand von Diagrammen gegenübergestellt. Die Anwenderin kann so auf einen Blick die Umweltwirkungen in den unterschiedlichen Wirkungsbereichen und mögliche Optimierungspotenziale erkennen. Dies liefert die Grundlage für eine rasche und nachvollziehbare Optimierung der Planungsvarianten.

Zum SABINA-Bilanzrechner wurde ein umfangreiches Benutzungshandbuch erstellt. Dieses beschreibt detailliert die einzelnen Arbeitsschritte von der Dateneingabe bis zur Ergebnisinterpretation. Es richtet sich sowohl an erfahrene Fachplanerinnen als auch an neue Anwenderinnen, die mit den Grundlagen der Lebenszyklusanalyse noch nicht allzu vertraut sind.

Als notwendige Ergänzung zum Schlussbericht steht ein umfassender Implementierungsleifaden zur Verfügung. Er dient als strukturierte Orientierungshilfe für die Auftraggeberinnen, um die zeitnahe Einbeziehung des SABINA-Bilanzrechners in den Entscheidungsprozess zu unterstützen.

Im Implementierungsleifaden sind u. a. die technischen Anforderungen definiert, die notwendigen Eingabedaten, die Verknüpfung mit Öko-Datenbanken und die Anforderungen an notwendige Datenaktualisierungen. Darüber hinaus liefert er eine Liste von technischen Anforderungen für die Implementierung des SABINA-Bilanzrechners in die IT-Umgebung der Auftraggeberinnen.

10.4 Schlussfolgerung und Projektnutzen

Um die Nachhaltigkeit im Strassenbau glaubhaft, langfristig und erfolgreich zu etablieren, braucht es einheitliche, allgemein anerkannte Bewertungskriterien und strukturierte Werkzeuge der Synthese. Das SABINA-Projekt liefert hierzu einen wertvollen Beitrag, um in den D-A-CH-Ländern die Lebenszyklusanalyse als Instrument der Entscheidungsfindung im Planungs- und Ausschreibungsprozess von Strassenbauprojekten zu etablieren. Für die beteiligten Akteurinnen in Behörden, Planungsbüros und Baufirmen werden komplexe Wirkzusammenhänge in nachvollziehbare Analyseschritte übersetzt und die Ergebnisse übersichtlich dargestellt.

Mit dem im Projekt erstellten SABINA-Bilanzrechner steht eine fundierte, anwenderfreundliche Webanwendung zur Verfügung, die es möglich macht, nachvollziehbare und quantifizierte technische, ökologische, ökonomische und sozio-ökologische Faktoren in die Lebenszyklusanalyse einheitlich und strukturiert einzubeziehen. Der SABINA-Bilanzrechner ermöglicht es Entscheidungsträgerinnen, Strasseninfrastruktur-Projekte objektiv zu bewerten und die Optimierungspotenziale von unterschiedlichen Ausführungsvarianten rasch zu identifizieren.

Die im Projekt mit dem SABINA-Bilanzrechner ausgeführten und ausführlich erläuterten Berechnungsbeispiele zeigen, dass eine konsequente Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten im Lebenszyklus von Strasseninfrastruktur-Projekten nicht nur ökologische und soziale Vorteile, sondern auch ökonomische Effizienzgewinne bringen kann.

So wird es möglich, Variantenentscheidungen nicht nur auf der Basis von Kosten, sondern auch von Umwelt- und Sozialwirkungen zu treffen. SABINA bildet so die Grundlage für ein modernes, ressourcenschonendes und gesellschaftlich verantwortungsbewusstes Infrastruktur- und Erhaltungsmanagement der Zukunft.

11 LITERATUR

- [1] D-A-CH Forschungsprojekt TAniA - Technische Anlagenbewertung im Asset-Management: A. Weninger-Vycudil, B. Brozek, T. Kessel, J. Sietas, B. Chylik, C. Schranz, D. Prammer, A. Vorwagner, P. Curschellas und R. Bühlmann, «Endbericht, Projekt finanziert im Rahmen der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung 2018,» Wien, 2019.
- [2] M. Hauschild, R. Rosenbaum und S. Olsen, «Life Cycle Assessment – Theory and Practice,» Springer Verlag, 2018.
- [3] R. Peyrl, «Ökobilanzen und Lebenszyklusanalysen – Möglichkeiten und Grenzen,» 2014.
- [4] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), «Climate Change 2022: Synthesis Report,» 2022.
- [5] W. Klöpffer, B. Grahl, «Life Cycle Assessment – A Guide to Best Practice,» Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2014.
- [6] M. Hauschild, M. Huijbregts, «Life Cycle Impact Assessment,» Springer Verlag, 2015.
- [7] M. Curran, «Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment,» Springer Verlag, 2017.
- [8] G. Sonnemann, M. Margni, «Life Cycle Management,» Springer Verlag, 2015.
- [9] ISO 14040, «Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines,» ISO, Geneva, 2006.
- [10] ISO 14044, «Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines,» ISO, Geneva, 2006.
- [11] Europäische Norm EN 15804:2022, «Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung,» Brüssel, 2022.
- [12] Europäische Norm EN 15643-5, «Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Teil 5 Leitfaden zu den Grundsätzen und den Anforderungen an Ingenieurbauwerke,» 2018.
- [13] Deutsche Richtlinie RStO 499, 2012, «Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2012, Korrektur 2020,» FGSV-Verlag, Köln, 2020.
- [14] Deutsche Richtlinie ZTV Asphalt-StB, 2014:, «Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2007/Fassung 2013,» FGSV Verlag, Köln, 2013.
- [15] Deutsche Richtlinie TL Asphalt-StB, 2013, «Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen, FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2007/Fassung,» FGSV Verlag, Köln, 2013.
- [16] Deutsche Richtlinie ZTV Beton-StB, 2007, «Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, FGSV -

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2007,» FGSV Verlag, Köln, 2007.

- [17] Deutsche Richtlinie TL Beton-StB, 2007, «Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,» FGSV Verlag, Köln, 2007.
- [18] Österreichische Richtlinie RVS 03.08.63, «Bautechnische Details - Oberbaubemessung. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2016/2021.
- [19] Österreichische Richtlinie RVS 03.08.64, «Bautechnische Details - Oberbauverstärkung von Asphaltstraßen. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2022/2023.
- [20] Österreichische Richtlinie RVS 03.08.68, «Bautechnische Details – Rechnerische Dimensionierung von Asphaltstraßen. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2018.
- [21] Österreichische Richtlinie RVS 03.08.69, «Bautechnische Details – Rechnerische Dimensionierung von Betonstraßen. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2020.
- [22] Österreichische Richtlinie RVS 08.97.05, «Anforderungen an Asphaltmischgut. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2019/2024.
- [23] Österreichische Richtlinie RVS 08.16.01, «Anforderungen an Asphaltsschichten. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2019.
- [24] Österreichische Richtlinie RVS 08.17.02, «Technische Vertragsbedingungen – Betondecken - Deckenherstellung. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2024.
- [25] Österreichische Richtlinie RVS 11.03.21, «Asphalt und Asphaltsschichten, Prüfung und Abrechnung, Abrechnungsbeispiele. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2019.
- [26] Schweizer Norm VSS 40320, «Dimensionierung des Strassenaufbaus, Äquivalente Verkehrslast,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2022.
- [27] Schweizer Norm VSS 40324, «Dimensionierung des Strassenaufbaus, Unterbau und Oberbau,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2019.
- [28] Schweizer Norm SN 640420, «Asphalt - Grundnorm,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2015.
- [29] Europäische Norm EN 13108, Teil 1 bis Teil 9, «Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen,» Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, 2016.
- [30] Schweizer Norm SN 640461, «Betondecken für Verkehrsflächen - Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten.,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2014.

- [31] Deutsche Richtlinie EWS 1997, «Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen. FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,» FGSV Verlag, Köln, 1997.
- [32] Deutsche Richtlinie EWS 1997, «Kommentar - Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen. FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,» FGSV Verlag, Köln, 1997.
- [33] A. Dahl, A. Kindl, C. Walther, D. Paufler-Mann, A. Roos, V. Wassmuth, F. Weinstock und W. Röhling, «Methodenhandbuch zum Bundesverkehrswegeplan 2030,» Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Karlsruhe, Berlin, Waldkirch, München, 2016.
- [34] Österreichische Richtlinie RVS 03.08.71, «Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Oberbaukonstruktionen im Straßenbau. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2001.
- [35] Österreichische Richtlinie RVS 13.05.11, «Lebenszykluskostenermittlung von Brücken. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2017/2024.
- [36] Österreichische Richtlinie RVS 13.05.31, «Bewertung des Anlagevermögens der Straßeninfrastruktur (Merkblatt, Entwurf),» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, Wien, 2019.
- [37] Österreichische Richtlinie VRV – Voranschlags- und Rechnungsabschlussverordnung 2015, «Österreichisches Bundesministerium für Finanzen,» Wien, 2015.
- [38] Schweizer Norm SN 641820, «Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Grundnorm.,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2019.
- [39] Deutsche Richtlinie RPE-Stra 01, «Richtlinie für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen. FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,» FGSV Verlag, Köln, 2001.
- [40] Deutsche Richtlinie ZTV ZEB-StB, «Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen. FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,» FGSV Verlag, Köln, 2006/2018.
- [41] Deutsche Richtlinie AP9, «Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung. FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,» FGSV Verlag, Köln, 2019.
- [42] Deutsche Richtlinie ZTV BEA-StB, «Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen – Asphaltbauweisen. FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,» FGSV Verlag, Köln, 2013.
- [43] Deutsche Richtlinie ZTV BEB-StB, «Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen. FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen,,» FGSV Verlag, Köln, 2015.
- [44] Weninger-Vycudil A., Simanek P., Brozek B. und Litzka J., «Handbuch Pavement Management in Österreich (Ausgabe 2016). PMS-Consult GmbH im Auftrag der ASFINAG,» Wien, 2016.
- [45] Österreichische Richtlinie RVS 13.01.15, «Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR. Richtlinien und Vorschriften für den

- Straßenbau,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2022.
- [46] Österreichische Richtlinie RVS 13.01.16, «Bewertung von Oberflächenschäden und Rissen auf Asphalt- und Betondecken. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2022.
 - [47] Österreichische Richtlinie RVS 13.01.41, «Straßeninstandsetzung, Asphaltstraßen, Grundlagen der Zustands- und Maßnahmenbeurteilung. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2015.
 - [48] Österreichische Richtlinie RVS 13.01.51, «Betondeckenerhaltung. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau,» FSV – Österreichische Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien, 2016.
 - [49] Schweizer Norm SN 640900, «Erhaltungsmanagement (EM) – Grundnorm, inkl. Anhang Begriffssystematik,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, 2022.
 - [50] Schweizer Richtlinie, «Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen – Planung und Durchführung des Unterhalts, Art. Nr. 308 103.d.,» Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, 2002.
 - [51] Schweizer Norm VSS 40931, «Erhaltungsmanagement – Erhaltungsstrategien für Fahrbahnen,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2019.
 - [52] Schweizer Norm SN 640907, «Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement von Strassen,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2019.
 - [53] Schweizer Norm VSS 40730B, «Erhaltung von Fahrbahnen; Kopfnorm; Massnahmenkonzept,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2019.
 - [54] Schweizer Norm VSS 40324, «Dimensionierung des Strassenaufbaus, Unterbau und Oberbau,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2019.
 - [55] Schweizer Norm VSS 40926, «Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF); Visuelle Zustandserhebung: Einzelindizes,» VSS – Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2019.
 - [56] Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen, Berlin: Beuth Verlag, 2020.
 - [57] Graubner, C.-A. et al., «Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturprojekte im Hinblick auf Nachhaltigkeit (FE 15.0494/ 2010/FRB). Schlussbericht,» Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach, 2010.
 - [58] Mielecke, T. et al. 2016, «Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit. Inklusive zugehöriger Leitfaden Nachhaltige Straßeninfrastruktur,» Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Bergisch Gladbach.
 - [59] Fischer, O. et al. 2016, «Einheitliche Bewertungskriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel,» Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Bergisch Gladbach.
 - [60] Graubner, C.-A. et al., «Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur (FE 09.0162/2011/HRB).

- Schlussberichte,» Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Darmstadt, 2012.
- [61] Forschungsprojekt KOMBAS - Kombinierte Bauweise Beton – Asphalt: Weninger Vycudil A., Wistuba M., Buchta M., Grönninger J., Chankov G. und Litzka J, «Endbericht. Verkehrsinfra-strukturforschung 2019,» Projekt finanziert von ASFINAG und BMK, Wien, 2021.
 - [62] Europäisches Forschungsprojekt ISABELA - Integration of social aspects and benefits A. Weninger-Vycudil, D. Kokot, G. Mladenović, J. Ćirilović, B. Kulauzović, P. Lepert, M. Antunes, P. Marcelino, J. Litzka, M. Wistuba, N. Tanasić, F. Schiffmann, R. Hajdin, «Final report-transnational research program 2014,» Conference of European Directors of Roads (CEDR), Brussels, Belgium, 2017.
 - [63] Chatti, K. and Zaabar, I., «NCHRP Report 720 - Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs. Michigan State University, research sponsored by the American Association of State Highway and Transportation Officials,» TRB Transport Research Board, Washington D.C., USA, 2012.
 - [64] Deutsches Insitut für Normung, DIN EN 15643: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken, Berlin: Beuth Verlag, 2021.
 - [65] C. Falter, T. Kessel, J. Pasderski, T. Pohl und M. Wistuba, «Road to Sustainability - Offenlegung ökologischer Potentiale im Straßenbau,» *Straße und Autobahn*, pp. 390-494, Mai 2022.
 - [66] Bundesamt für Justiz, Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG: Gesetz zu Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, Berlin, 2012.
 - [67] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, «ÖKOBAUDAT - Sustainable Construction Information Portal,» Berlin, 2021.
 - [68] S. Thomas und H. D. Ya, «A social life cycle assessment model for building construction in Hong Kong,» *Int J Life Cycle Assessment*, Bd. 20, pp. 1166-1180, 2015.
 - [69] X. Zheng, S. Easa, Y. Zhengxian, T. Ji und Z. Jiang, «Life-Cycle Sustainability Assessment of Pavement Maintenance Alternatives:,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 659-672, 2018.
 - [70] E. S. Andrews, L.-P. Barthel, T. Beck, C. Benoit, A. Ciroth, C. Cucuzzella, C.-O. Gensch, J. Hébert, P. Lesage, A. Manhart und P. Mazeau, Guidelines for social life cycle assessment of products, UNEP United Nations Environmental Program, 2009.
 - [71] e. a. S. Resch, «Der Weg zum lebenszyklusorientierten Infrastrukturbau: Die 3 Säulen erfolgreicher Bauprojekte in einer digitalen Wirtschaft.,» *IG Lebenszyklus Bau*, 2017.
 - [72] R. Frischknecht, N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, R. Dones, T. Heck, S. Hellweg, R. Hirsch, T. Nemecek, G. Rebitzer, M. Spielmann und G. Wernet, «"Overview and Methodology", Data v2.0 (2007),» ecoinvent, Dübendorf, 2007.
 - [73] KBOB, eco-bau und IPB, «UVEK Ökobilanzdatenbestand DQRv2:2022; Grundlage für die KBOB-Empfehlung 200 /1:2022: Ökobilanzdaten im Baubereich, Stand 2022,» Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik, Bern, 2022.
 - [74] IPCC, «Climate Change 2023: Synthesis Report,» Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023, Interlaken, 2023.

- [75] R. Frischknecht, F. Wyss, S. Büsser Knöpfel, T. Lützkendorf und M. Balouktsi, «"Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach",» The International Journal of Life Cycle Assessment,, 2015.
- [76] M. Finkbeiner, V. Bach und A. Lehmann, «"Environmental Footprint: Der Umweltfussabdruck von Produkten und Dienstleistungen", Abschlussbericht,» Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, 2019.
- [77] KBOB, ecobau, IPB, «Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz, Version 6.0,» Plattform Ökobilanzdaten im Baubereich, Bern, 2022.
- [78] M. Klingler, D. Savi und G. Doka, «"Harmonisierte Ökobilanzen der Entsorgung von Baustoffen", Für die Liste der Ökobilanzdaten im Baubereich,» Büro für Umweltchemie, Zürich, 2019.
- [79] Bundesamt für Umwelt (BAFU), «„Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der kologischen Knappheit“,» Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2021.
- [80] Pinkovsky L. (2005), Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage, Braunschweig: Dissertation, ausgeführt an der TU-Braunschweig, 2005.
- [81] Watanatada T., Harral C.G., Paterson W.D.O., Dhareshwar A.M., Bhandari A. Tsunokawa K. (1987), The Highway Design and Maintenance Standards Model, Baltimore, USA: The Highway Design and Maintenance Standards Models Series, Volume One: Description of the HDM-III Model,, 1987.
- [82] Odoki J.B. and Kerali H.G.R. (2000)., HDM-4 Highway Development & Management, Volume Four: Analytical Framework and Model Descriptions, PIARC, Version 1.0, The Highway Development and Management Series, 2000.
- [83] Pichler W. (1981)., Entscheidungsmodell für die Wahl der Oberbaukonstruktion im Strassenbau., Graz: Dissertation, TU-Graz, 1981.
- [84] Zaabar I., Chatti K. and Lajnef N. (2018), A mechanistic approach for estimating the roughness-induced rolling resistance and fuel consumption of articulated trucks, The Netherlands: 15th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology, 2018.
- [85] Maerachalk G., Ueckermann A. und Heller S. (2011), Längesebenheitsauswerteverfahren "Bewehrtes Längsprofil", Weiterentwicklung der Längesebenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung, Bergisch Gladbach, BRD: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Straßenbau Heft S37, 2011.
- [86] Weninger-Vycudil A. (2001), Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches PMS, Wien: Dissertation, ausgeführt am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Technische Universität Wien, 2001.
- [87] Herrmann T., Lüking J., Schindele N., Adey B. und Hajdin R. (2008) , Massnahmenplanung im Erhaltungsmangement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen, Bern, Schweiz: Forschungsauftrag VSS 2004/714, Einzelprojekt 4, auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, 2008.

- [88] RVS 02.02.21 (2015) , Verkehrssicherheitsuntersuchungen, Wien: Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen. Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, 2015.
- [89] Brozek B., Litzka J. und Weninger-Vycudil A. (2009), Entwicklung eines Nutzerkostenmoduls im österreichischen PMS, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Straßenforschung Heft 585, 2009.
- [90] BASt (2024), Verkehrs und Unfalldaten - Kurzzusammenstellung der Entwicklung in Deutschland, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2024.
- [91] ASFINAG (2021), Road Safety Program 2030, Salzburg: ASFINAG, Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft, 2021.
- [92] Chatti, K. and Zaabar, I. (2012), NCHRP Report 720 - Estimating the Effects of Pavement Condition on Vehicle Operating Costs, Michigan State University: research sponsored by the American Association of State Highway and Transportation Officials in cooperation with the Federal Highway Administration, TRB Transport Research Board, Washington D.C., USA, 2012.
- [93] B. f. S. ASTRA, «Richtlinie 11001 "Normalprofile Nationalstrassen 1. und 2. Klasse",» ASTRA, Bern, 2022.
- [94] Bundesamt für Strassen ASTRA, «Fachhandbuch Trasse / Umwelt,» Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, 2022.
- [95] Forschungsprojekt Asphaltrechner - Ökobilanzrechner für Asphalt: Pohl T., Spitzhofer N., Osterwalder D., «Asphaltrechner - Hintergrundbericht des Asphalt-Ökobilanzrechners,» Projekt finanziert von BAFU, asphaltuisse sowie den Tiefbauämtern ZH, SG, GR, TG, BS, Hombrechtikon, 2025.
- [96] Bundesamt für Justiz - Kompetenzzentrum Rechtsinformationssysteme des Bundes, «Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung - ABBV), Anlage (zu § 2 Absatz 1),» Bundesrepublik Deutschland, 53113 Bonn, 2010.
- [97] Österreichische Richtlinie RVS 03.03.31, «"Querschnittselemente Freilandstraßen; Verkehrs- und Lichtraum. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen,», FSV - Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse-, Schiene-, Verkehr, Wien, 2005.
- [98] ASFINAG, «Planungshandbuch Straße - Bau - Technische Richtlinie,» ASFINAG, Wien, 2025.
- [99] Wissenschaftliche Dienste, Deutscher Bundestag, «Sachstand "Regelquerschnitte beim Autobahnbau",» Deutscher Bundestag, Berlin, 2022.
- [100] Deutsche Richtlinie TL SoB-StB, 2020, «Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB),» FGSV Verlag, Köln, 2020.
- [101] T. Kessel, J. Pasderski, C. Falter, M. P. Wistuba, J. Grönniger, T. Pohl, A. Hellenbrand, M. Ulbricht und P.-S. Alles, «FE 04.0341/2021/ARB Nachhaltigkeitspotentiale im Straßenbau mit dem Fokus auf Treibhausemissionen, Energiebedarf und Ressourcenschonung,» Bundesanstalt für Straßenwesen BASt, Bergisch Gladbach, 2023.
- [102] A. Gautschi, «Green Economy - The Method of Ecological Scarcity in Policy Making, in Economics and Environmental Monitoring Division,» *Bundesamt für Umwelt (BAFU)*, 2013.

- [103] Bundesamt für Umwelt BAFU, «Methode der ökologischen Knappheit,» Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, 2022.
- [104] S. Hellweg, S. Rubli und R. Juraske, «Vorlesung: Grundzüge "Ökologische Systemanalyse",» ETH - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich, 2017.
- [105] G. Bartels, L. Seiler, S. Würmli, L. Amrein und M. Oberkofler, «Richtlinie Normalprofile Nationalstrassen 1. und 2. Klasse,» Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, 2022.

12 ABBILDUNGEN

Abbildung 1: Systemabgrenzung gemäss EN 15643-5. [12]	20
Abbildung 2: Beispiel für die Strassenzustandsentwicklung während 30 Jahren abhängig von den Ausgaben der Strassenbaulastträgerin [34]	27
Abbildung 3: VSS-Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmassnahmen [53]	32
Abbildung 4: Schritte der Ökobilanzierung nach ISO 14040ff. Das Vorgehen zwischen den einzelnen Schritten ist iterativ. [9].....	33
Abbildung 5: Schematische Darstellung des technischen Geltungsbereichs.....	42
Abbildung 6: Schematische Darstellung des Zustandsverlaufes im technischen Lebenszyklus nach [1]	44
Abbildung 7: Standardlebenszyklus eines Strassenbauwerks mit linearen und zirkulären Anteilen [65].....	47
Abbildung 8: Beeinflussbarkeit von Kosten im Lebenszyklus [71]	50
Abbildung 9: Umweltwirkungen und Bewertungsmethoden [79].....	75
Abbildung 10: Beispiele Tagesganglinien [80].....	86
Abbildung 11: Zusammenhang IRI und zusätzlicher Treibstoffverbrauch für unterschiedliche Fahrzeugkategorien und Geschwindigkeiten (kalibrierte HDM 4 Modelle) nach [63]	92
Abbildung 12: Zusammenhang IRI und zusätzlicher Treibstoffverbrauch für unterschiedliche Geschwindigkeiten von Lastkraftwagen [84]	93
Abbildung 13: Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch EFT_{IRI}	95
Abbildung 14: Zusammenhang AUN und IRI für verschiedene Welligkeiten nach [85]	96
Abbildung 15: Login-Seite des SABINA-Bilanzrechners.....	124
Abbildung 16: Webbasierter SABINA-Bilanzrechner (Eingangsdaten)	125
Abbildung 17: Relative Tagesganglinie als Basis der Berechnungsvarianten.....	129
Abbildung 18: Zusammenhang der IRI-Funktionen vor und nach Massnahme	132
Abbildung 19: Normalprofil einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn, Bsp. Schweiz [93]	133
Abbildung 20: Verkehrslastklassen für die Dimensionierung auf 20 Jahre gemäss VSS Norm 40324:2019, Bsp. Schweiz [27].....	134
Abbildung 21: Oberbautyp 2 gemäss VSS Norm 40324:2019, Bsp. Schweiz [27].....	135
Abbildung 22: Typischer Schichtaufbau von Schweizer Nationalstrassen [94]	136
Abbildung 23: Lebenszyklus der Berechnungsvariante CH-1, Bsp. Schweiz.....	138
Abbildung 24: Lebenszyklus der Berechnungsvariante CH-2, Bsp. Schweiz.....	142
Abbildung 25: Ökonomische Bewertung, Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner).....	145
Abbildung 26: Ökologische Bewertung, Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner).....	147
Abbildung 27: Ökologische Bewertung Teil Herstellung (Module A1 bis A3), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)	148
Abbildung 28: Ökologische Bewertung Teil Errichtung (Module A4 bis A5), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)	149
Abbildung 29: Ökologische Bewertung Wirkung Baustelle auf Verkehr (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)	151
Abbildung 30: Ökologische Bewertung aller Wirkungen (alle Fahrzeugkategorien und alle Phasen), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner)	152
Abbildung 31: Ökologische Bewertung der Langzeitwirkungen (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner).....	154
Abbildung 32: Ökologische Bewertung der Langzeitwirkungen (Fahrzeugkategorie E-PKW), Bsp. Schweiz (© SABINA-Bilanzrechner).....	155
Abbildung 33: RVS 03.03.31: Querschnitt einer Strasse mit zweistreifigen Richtungsfahrbahnen für eine Verkehrsführung 4+0, Bsp. Österreich.....	156

Abbildung 34: Bauweisen mit Asphaltdecke der Lastklasse LK82, AS2 gemäss den RVS 03.08.63 [18], Bsp. Österreich	157
Abbildung 35: Bauweisen mit Betondecke der Lastklasse LK89, BE1 gemäss den RVS 03.08.63 [18], Bsp. Österreich	158
Abbildung 36: Lebenszyklus der Berechnungsvariante AT-1, Bsp. Österreich	159
Abbildung 37: Lebenszyklus der Berechnungsvariante AT-2, Bsp. Österreich	164
Abbildung 38: Ökonomische Bewertung, Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)	167
Abbildung 39: Ökologische Bewertung, Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner).....	168
Abbildung 40: Ökologische Bewertung Teil Herstellung (Module A1 bis A3), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner).....	170
Abbildung 41: Ökologische Bewertung Teil Errichtung (Module A4 bis A5), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner).....	171
Abbildung 42: Ökologische Bewertung Wirkung Baustelle auf Verkehr (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner).....	172
Abbildung 43: Ökologische Bewertung aller Wirkungen (alle Fahrzeugkategorien und alle Phasen), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)	173
Abbildung 44: Ökologische Bewertung der Langzeitwirkungen (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)	174
Abbildung 45: Ökologische Bewertung der Langzeitwirkungen (Fahrzeugkategorie E-PKW), Bsp. Österreich (© SABINA-Bilanzrechner)	175
Abbildung 46: Regelquerschnitt RQ 31 [99], Bsp. Deutschland.....	176
Abbildung 47: Bauweise mit Asphaltdecke der Belastungsklasse Bk100 gemäss den RStO 12 [13], Bsp. Deutschland.....	178
Abbildung 48: Bauweise mit Betondecke der Belastungsklasse Bk100 gemäss den RStO 12 [13], Bsp. Deutschland.....	178
Abbildung 49: Lebenszyklus der Berechnungsvariante DE-1, Bsp. Deutschland	180
Abbildung 50: Lebenszyklus der Berechnungsvariante DE-2, Bsp. Deutschland	183
Abbildung 51: Ökonomische Bewertung, Asphaltbauweise (DE-1), Bsp. Deutschland (© SABINA-Bilanzrechner)	185
Abbildung 52: Ökonomische Bewertung, Betonbauweise (DE-2), Bsp. Deutschland (© SABINA-Bilanzrechner)	186
Abbildung 53: Ökologische Bewertung, Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1 (© SABINA-Bilanzrechner)	188
Abbildung 54: Ökologische Bewertung, Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner)	189
Abbildung 55: Ökologische Bewertung der <i>Herstellung</i> (Module A1 bis A3), Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1 (© SABINA-Bilanzrechner) ...	190
Abbildung 56: Ökologische Bewertung der <i>Herstellung</i> (Module A1 bis A3), Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner).....	191
Abbildung 57: Ökologische Bewertung der <i>Errichtung</i> (Module A4 bis A5), Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1 (© SABINA-Bilanzrechner).....	192
Abbildung 58: Ökologische Bewertung der <i>Errichtung</i> (Module A4 bis A5), Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner)	193
Abbildung 59: Ökologische Bewertung der Wirkung Baustelle auf Verkehr (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1 (© SABINA-Bilanzrechner)	194
Abbildung 60: Ökologische Bewertung der <i>Wirkung Baustelle auf Verkehr</i> (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner)	195

Abbildung 61: Ökologische Bewertung <i>aller Wirkungen</i> (alle Fahrzeugkategorien und alle Phasen), Bsp. Deutschland, Asphaltbauweise, Berechnungsvariante DE-1 (© SABINA-Bilanzrechner).....	197
Abbildung 62: Ökologische Bewertung <i>aller Wirkungen</i> (alle Fahrzeugkategorien und alle Phasen), Bsp. Deutschland, Betonbauweise, Berechnungsvariante DE-2 (© SABINA-Bilanzrechner).....	198
Abbildung 63: Ökologische Bewertung der <i>Langzeitwirkungen</i> (alle Fahrzeugkategorien), Bsp. Deutschland, oben Asphaltbauweise (Berechnungsvariante DE-1) und unten Betonbauweise (Berechnungsvariante DE-2) (© SABINA-Bilanzrechner).....	199
Abbildung 64: Ökologische Bewertung der <i>Langzeitwirkungen</i> (Fahrzeugkategorie E-PKW), Bsp. Deutschland, oben Asphaltbauweise (Berechnungsvariante DE-1) und unten Betonbauweise (Berechnungsvariante DE-2) (© SABINA-Bilanzrechner).....	200

13 TABELLEN

Tabelle 1: Überblick zu den Quellen für die Begriffsbestimmungen im Projekt SABINA.....	11
Tabelle 2 Verfahren der Investitionsrechnung.....	27
Tabelle 3: Relevante Literatur für das Projekt SABINA.....	40
Tabelle 4: Indikatoren und Einflussfaktoren der ökonomischen Nachhaltigkeit.....	52
Tabelle 5: Im Projekt SABINA berücksichtigte Einflussfaktoren der sozialen Nachhaltigkeit.....	54
Tabelle 6: Herkunft der Rezepturen für die Baustoffe.....	60
Tabelle 7: SimaPro-Prozess für die Asphaltmischgutsorte AC 11 H Deckschicht aus der Schweiz.....	62
Tabelle 8: SimaPro-Prozess für Oberbeton der Sorte C20/25, 0/32 mm, XC 1, XC 2 aus der Schweiz.....	64
Tabelle 9: Transportdistanzen der Inhaltsstoffe im SABINA-Bilanzrechner.....	67
Tabelle 10: Bauprozessbeschreibung für das Aufbrechen einer Walzasphaltschicht.....	68
Tabelle 11: Bauprozesse und Einbauleistungen für die Errichtung (Modul A5).....	69
Tabelle 12: Bauprozesse und Einbauleistungen für den Rückbau (Modul C1).....	70
Tabelle 13: Richtgrößen Entsorgungswege Asphalt und Beton (Schweiz).....	71
Tabelle 14: Wirkungskategorien des Environmental Footprint 3.1 [76].....	74
Tabelle 15: Treibstoff- und Energieverbrauch in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für ausgewählte Fahrzeugkategorien.....	90
Tabelle 16: Modellparameter k und d für den Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch.....	94
Tabelle 17: Einschränkung auf Gegenrichtungsfahrbahn.....	106
Tabelle 18: Beispiele für Unfallraten auf Autobahnen.....	114
Tabelle 19: Prozentuale Werte der relativen Tagesganglinie.....	129
Tabelle 20: Kraftstoff- und Energieverbrauch.....	130
Tabelle 21: Funktionaler Zusammenhang Verbrauch und Ebenheit (IRI).....	131
Tabelle 22: IRI-Werte der vor und nach der ersten Massnahme aller Berechnungsvarianten.....	131
Tabelle 23: Schichtaufbau der Berechnungsvariante CH-1, Bsp. Schweiz.....	137
Tabelle 24: Nutzungsdauern unterschiedlicher Strassenschichten in der Asphaltbauweise, Bsp. Schweiz.....	138
Tabelle 25: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante CH-1, Bsp. Schweiz.....	139
Tabelle 26: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante CH-1, Bsp. Schweiz.....	140
Tabelle 27: Schichtaufbau der Berechnungsvariante CH-2, Bsp. Schweiz.....	140
Tabelle 28: Nutzungsdauern unterschiedlicher Strassenschichten in der Asphaltbauweise, Bsp. Schweiz.....	141

Tabelle 29: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante CH-2, Bsp. Schweiz	143
Tabelle 30: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante CH-2, Bsp. Schweiz	143
Tabelle 31: Schichtaufbau der Berechnungsvariante AT-1, Bsp. Österreich	158
Tabelle 32: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante AT-1, Bsp. Österreich .	161
Tabelle 33: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante AT-1, Bsp. Österreich	161
Tabelle 34: Schichtaufbau der Berechnungsvariante AT-2, Bsp. Österreich	162
Tabelle 35: Nutzungsdauern unterschiedlicher Strassenschichten in der Betonbauweise, Beispiel Österreich	163
Tabelle 36: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante AT-2, Bsp. Österreich .	165
Tabelle 37: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante AT-2, Bsp. Österreich	165
Tabelle 38: Schichtaufbau der Berechnungsvariante DE-1, Bsp. Deutschland	178
Tabelle 39: Nutzungsdauern unterschiedlicher Strassenschichten in der Asphaltbauweise, Beispiel Deutschland	179
Tabelle 40: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante DE-1, Bsp. Deutschland	181
Tabelle 41: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante DE-1, Bsp. Deutschland	181
Tabelle 42: Schichtaufbau der Berechnungsvariante DE-2, Bsp. Deutschland	182
Tabelle 43: IRI-Werte der Massnahmen der Berechnungsvariante DE-2, Bsp. Deutschland	184
Tabelle 44: Kosten der Massnahmen in Berechnungsvariante DE-2, Bsp. Deutschland	184
Tabelle 45: Modellparameter k und d für den Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch	15



ANHANG A: IMPLEMENTIERUNGSLEITFADEN

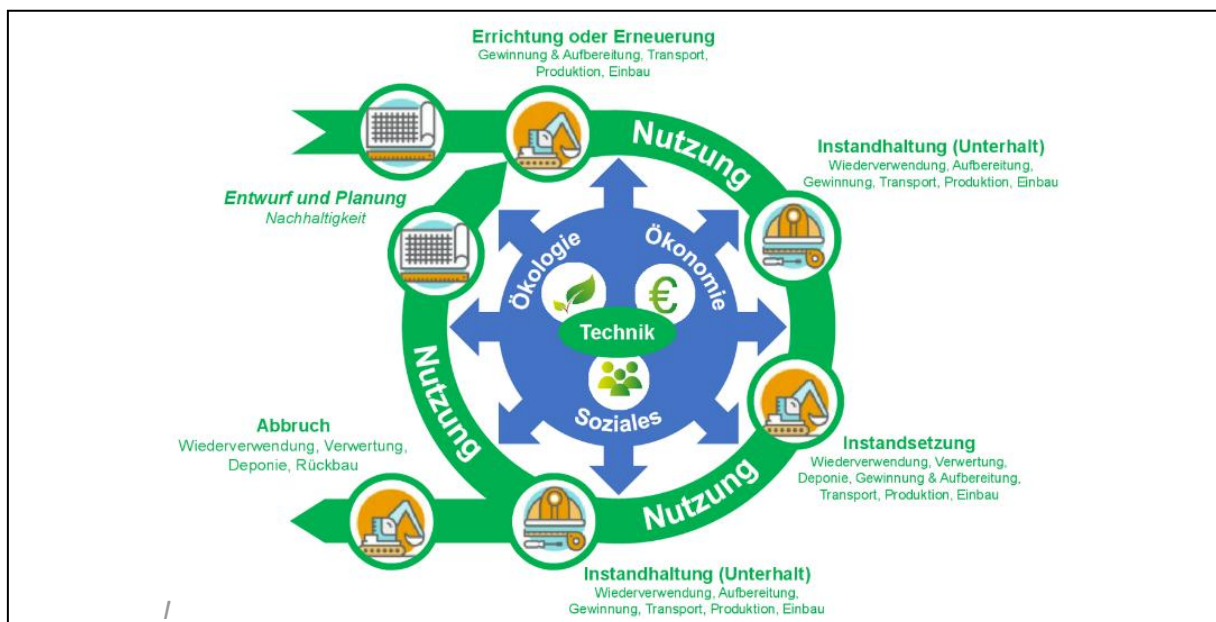
Leitfaden zur Implementierung

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

D-A-CH Kooperation

Verkehrsinfrastrukturforschung 2022

D-A-CH 2022



Januar 2026

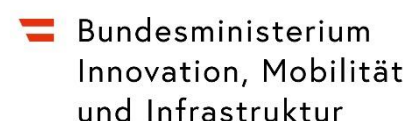
Impressum

Programmerstellung und -finanzierung der D-A-CH Kooperation:

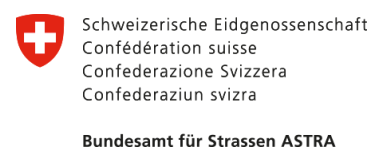
Bundesministerium für Verkehr (BMV)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland



Bundesministerium für Innovation, Mobilität und
Infrastruktur (BMIMI)
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich



Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Papiermühlestrasse 13
3063 Ittigen
Schweiz



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich



Für den Projektinhalt verantwortlich:

Umtec Technologie AG
Eichtalstrasse 54
8634 Hombrechtikon, Schweiz



Technische Universität-Braunschweig
Institut für Straßenwesen
Beethovenstraße 51 b
38106 Braunschweig, Deutschland



Hochschule Campus Wien – University of Applied Sciences
Department Bauen und Gestalten
Favoritenstraße 226
1100 Wien, Österreich



SABINA

Strassenbauweisen Bilanzierung Nachhaltigkeit

D-A-CH 2022

Auftragnehmer

Umtec Technologie AG, Schweiz

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Deutschland

Hochschule Campus Wien, Department Bauen und Gestalten, Österreich

Autorinnen und Autoren

Thomas POHL, MSc.

Dr. Alfred WENINGER-VYCUDIL

Univ.-Prof. Dr. Michael P. WISTUBA

DIⁱⁿ Nina SAM

Dominik OSTERWALDER, MSc.

Nick SPITZHOFFER, BSc.

Auftragnehmerinnen:

Umtec Technologie AG, Schweiz

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Deutschland

Hochschule Campus Wien, Department Bauen und Gestalten, Österreich

Inhalt

Anhang A: Implementierungsleitfaden	1
1 Einleitung	6
1.1 Zielsetzung	6
1.2 Zentrale Fragen zur Implementierung	6
1.3 Allgemeine Randbedingungen für eine Implementierung	7
2 Anwendungsrahmen	9
2.1 Technischer Anwendungsbereich	9
2.2 Technischer Geltungsbereich	10
2.3 Geographischer Geltungsbereich	11
2.4 Zielgruppe der Anwendung	12
3 Eingangsdaten und Datengrundlagen	13
3.1 Eingangsdaten	13
3.2 Öko-Datenbanken	14
3.3 Datenaktualisierung und -anpassung	14
4 Praktische Umsetzung	16
4.1 Grundlagen und Ergebnisse	16
4.2 Möglichkeiten der Verwendung des SABINA-Bilanzrechners	16
4.2.1 Online-Nutzung des SABINA-Bilanzrechners	16
4.2.2 Implementierung des SABINA-Bilanzrechners in eine IT-Umgebung	17
4.3 Schulungen	19
4.4 Prozesse nach Implementierung	20
4.5 Risiko der Implementierung	21

Hinweise zu Schreibweisen

Entgegen der Rechtschreibung in Deutschland und Österreich wird in der Schweiz das „ß“ generell durch „ss“ ersetzt, also auch nach langen Vokalen und Diphthongen. In diesem Bericht ist die schweizerische Schreibweise übernommen, der Buchstabe „ß“ wird nur bei Eigennamen und bei nationalen Quellenbezeichnungen beibehalten.

In diesem Bericht wird der Dezimalpunkt anstelle des Dezimalkommas verwendet, wie dies in einigen Schweizer Kantonen üblich ist.

In Bezug auf die gendergerechte Schreibweise wird in diesem Bericht zur besseren Lesbarkeit stets das generische Femininum verwendet. Die feminine Form bezieht sich nicht nur auf Frauen, sondern auf Personen aller Geschlechter.

1 EINLEITUNG

1.1 Zielsetzung

Dieser Implementierungsleitfaden unterstützt die Implementierung des SABINA-Bilanzrechners in einer Strassenverwaltung. Die enthaltenen Empfehlungen sind ein Ergebnis des Projekts SABINA und beruhen auf der systematischen Erprobung der entwickelten Modelle und Algorithmen im Rahmen der praxisnahen Berechnungsbeispiele (siehe Schlussbericht). Die Implementierung ist dabei nicht ausschliesslich durch technische Lösungen gewährleistet, vielmehr ist es erforderlich, die gewonnenen Erkenntnisse mit den spezifischen Anforderungen der massgebenden Geschäftsprozesse des Lebenszyklusmanagements in der Strassenverwaltung zu verknüpfen, die ihrerseits wesentlich von den organisatorischen Strukturen abhängig sein können. Diese Verknüpfung stellt sicher, dass die entwickelten Instrumente nicht isoliert eingeführt, sondern in bestehende organisatorische Strukturen und Entscheidungsebenen integriert werden. Nur durch eine solche Einbettung können Synergieeffekte zwischen methodischer Innovation und etablierten Verwaltungs- und Steuerungsprozessen erzielt werden.

Die nachfolgenden Kapitel systematisieren diese Anforderungen und leiten daraus konkrete Handlungsempfehlungen für eine umfassende Implementierungsstrategie ab. Diese Empfehlungen adressieren sowohl technische als auch organisatorisch-prozessuale Aspekte. Auf diese Weise wird ein strukturierter Orientierungsrahmen geschaffen, der es Strassenverwaltungen ermöglicht, den entwickelten SABINA-Bilanzrechner zielgerichtet, effizient und im Einklang mit bestehenden Strukturen und verwaltungstechnischen Vorgaben in ihre Entscheidungsprozesse zu implementieren. Voraussetzung für eine umfassende Akzeptanz ist ein daraus quantifizierbarer Nutzen zur Verbesserung der objektiven Entscheidungsfindung bei der Auswahl von Strassenoberbau-Konstruktionen.

1.2 Zentrale Fragen zur Implementierung

Der Implementierungsleitfaden kann herangezogen werden, um die Einführung des SABINA-Bilanzrechners strukturiert und nachvollziehbar zu gestalten. Er dient als praxisorientierte Orientierungshilfe und beschreibt die notwendigen Schritte, Zuständigkeiten und Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Umsetzung. Durch die Bündelung von fachlichen Anforderungen, organisatorischen Abläufen und technischen Voraussetzungen unterstützt der Leitfaden die Anwenderinnen dabei, Fehler zu vermeiden, Ressourcen effizient einzusetzen und eine einheitliche Vorgehensweise sicherzustellen. Damit bildet er die Grundlage für eine nachhaltige und wirksame Implementierung in bestehende Strukturen und Prozesse.

Vor dem Start einer umfassenden Implementierung sind folgende, primär organisatorische Fragen mit den betroffenen Personen und Interessensgruppen (Stakeholder) zu diskutieren:

- Welche spezifischen Anwendungsbereiche und Prozesse sollten mit dem SABINA-Bilanzrechner unter Berücksichtigung des generellen Anwendungsrahmens (siehe Kapitel 2) abgedeckt werden?
- Auf welcher Prozessebene in der Planung bzw. bei der Entscheidungsfindung von Oberbaulösungen soll der SABINA-Bilanzrechner eingesetzt werden und in welchen Teilschritten des Entscheidungsprozesses können die Ergebnisse einer Anwendung des SABINA-Bilanzrechners implementiert werden?
- Worin besteht der Nutzen in einer Anwendung der Ergebnisse?
- Welche Anpassungen bei der Erhebung, Verarbeitung und vor allem Aktualisierung von Ökobilanzdaten sind erforderlich?
- Wer verwendet die Ergebnisse aus dem Prozess und wie sollen die Ergebnisse aufbereitet werden?
- Welcher praktische Aufwand ist mit der Implementierung des SABINA-Bilanzrechners verbunden?

1.3 Allgemeine Randbedingungen für eine Implementierung

Für eine erfolgreiche Implementierung wird ein iterativer Prozess empfohlen, wobei folgende Randbedingungen unbedingt zu beachten sind:

- Die Zielsetzungen für das in der Strassenverwaltung bereits implementierte Lebenszyklusmanagement sollten in Einklang mit dem Untersuchungsrahmen und den Anwendungsbereichen des SABINA-Bilanzrechners stehen. Dies bedeutet, dass eine Implementierung primär in jenen organisatorischen Einheiten erfolgen sollte, wo eine Beurteilung der Lebenszyklen von Anlagen der Strassenverkehrsinfrastruktur bereits jetzt vorgenommen wird (z. B. strategisches Erhaltungsmanagement, operatives Erhaltungsmanagement).
- Die für eine praktische Anwendung notwendigen Eingangsdaten der zu bewertenden Oberbaukonstruktionen, der Beanspruchungen aus Verkehr, der Gestaltung möglicher Verkehrsführungen während der Baumassnahmen und des aktuellen Zustandes (Längsebenheit) müssen für die Analyse in ausreichender Genauigkeit zur Verfügung stehen. Dies setzt auch einen bestimmten Planungsstand des zu bewertenden Bauprojekts voraus, der zumindest jener einer *Einreichplanung* entspricht.

Grundsätzlich sollten die Daten aus dem strategischen Erhaltungsmanagement hierfür ausreichend sein, wobei zusätzliche Annahmen aus der operativen Erhaltungsplanung in einzelnen Bereichen notwendig sind (z. B. mögliche Baustellenverkehrsführung).

- Der SABINA-Bilanzrechner verfügt über eine interne Datenbank, wo die entsprechenden Kennzahlen der Materialien (z. B. GWP) sowie bestimmter Prozesse abgespeichert sind. Dabei werden die qualitätsgesicherten Daten der *Ecoinvent*-Datenbank für Deutschland und Österreich sowie der *UVEK*-Datenbank für die Schweiz herangezogen. Diese Daten entsprechen den Anforderungen für die Durchführung einer qualitätsgesicherten Ökobilanzierung von Baumaterialien, Mischungen und der Herstellung (siehe hierzu Kapitel 3.2). Grundsätzlich können Daten aus anderen Quellen herangezogen werden, jedoch ist dabei auf eine zumindest gleichwertige Qualitätssicherung und eine entsprechende Vergleichbarkeit des Bewertungsrahmens (z. B. welche Teilprozesse sind im jeweiligen Wert abgebildet) zu achten, was eine wesentliche Voraussetzung darstellt. Auf die notwendigen Qualitätssicherungsprozesse für die Datenaktualisierung bzw. einen möglichen Datenaustausch wird in Kapitel 3.3 näher eingegangen.

2 ANWENDUNGSRAHMEN

2.1 Technischer Anwendungsbereich

Der SABINA-Bilanzrechner ist als Entscheidungshilfe für die Untersuchung unterschiedlicher Oberbauvarianten konzipiert und erfordert somit die Eingabe von zum Teil sehr detaillierten Daten hinsichtlich der Materialien, Lebenszyklen, Erhaltungsmassnahmen etc.. In der aktuellen Version des SABINA-Bilanzrechners ist zumindest ein Projektbearbeitungsstand mit technischen Lösungen nötig, die zumindest eine Oberbaudimensionierung, Verstärkungsdimensionierung oder bei Instandsetzungsmassnahmen im Bereich der Decke eine geeignete Dickenabschätzung voraussetzen und den jeweiligen betroffenen Schichten des Strassenoberbaus auch bereits die entsprechenden Materialien zuordnen. Dies entspricht dem Stand eines *Einreichprojekts*.

Der SABINA-Bilanzrechner führt eine vergleichende Analyse von zumindest zwei zu untersuchenden Bauvarianten durch. Grundsätzlich handelt es sich dabei um eine

- **Basisvariante** und um eine
- **Vergleichsvariante**.

Die Eingangswerte der jeweiligen Variante können von der Programmanwenderin entsprechend der zu untersuchenden Oberbaulösung selbst festgelegt werden, sodass es auch der Anwenderin obliegt, welche Lösung als Basisvariante oder als Vergleichsvariante im System verwendet wird.

Da der SABINA-Bilanzrechner grundsätzlich **für Vergleichsrechnungen** herangezogen werden soll, ist es besonders wichtig, dass bei Vergleichen immer der gleiche Untersuchungsrahmen für den entsprechenden Untersuchungsgegenstand, den Strassenoberbau, herangezogen wird. Ist dies nicht der Fall, können die Ergebnisse nicht objektiv miteinander verglichen werden.

Der relative Vergleich zwischen der Basisvariante und der Vergleichsvariante ist das Ergebnis der Analyse. Die Verwendung von Absolutwerten der Ergebnisse ist wesentlich von den Eingangsgrössen abhängig. Daher ist eine kritische ingenieurmässige Beurteilung für die Interpretation von Absolutergebnissen bzw. -werten notwendig und dringend empfohlen.

Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben werden für den SABINA-Bilanzrechner folgende Anwendungsbereiche definiert:

- **Vergleich von Oberbauvarianten** auf einem Strassenabschnitt im Rahmen der **strategischen Erhaltungsplanung** (Pavement Management bzw. Asset Management) als Grundlage für eine weiterführende Bearbeitung auf Projektebene (operatives Erhaltungsmanagement).
- **Vergleich von Oberbauvarianten** im Rahmen der **Detailplanung eines Erhaltungsprojekts Strassenoberbau** auf der Grundlage von Analysen und Untersuchungen auf Projektebene als Teil des operativen Erhaltungsmanagements.
- **Vergleich von Angebotsvarianten** im Rahmen der Ausschreibung und Vergabe von Erhaltungsprojekten im Bereich des Strassenoberbaus. Der Anwendungsbereich wird dabei primär bei der ausschreibenden Stelle gesehen, die mit dem SABINA-Bilanzrechner die Möglichkeiten hat, Alternativangebote mit einer Basisvariante zu vergleichen.

Da der SABINA-Bilanzrechner in der derzeitigen Ausbaustufe ausschliesslich eine Bewertung der Strassenbefestigung beinhaltet, ist es für Entscheidungsprozesse, wo mehrere Anlagen zu berücksichtigen und gegebenenfalls die Wirkungen durch mehrere Anlagen zu vergleichen sind (z. B. Vergleich Variante lärm mindernde Deckschicht mit Lärmschutzwand), nur eingeschränkt einsetzbar, kann aber die Grundlage für zukünftige Erweiterungen bzw. Verknüpfungen mit anderen Entscheidungsinstrumenten bilden. Der derzeitige Bearbeitungsrahmen des SABINA-Bilanzrechners sieht dies jedoch nicht explizit vor.

2.2 Technischer Geltungsbereich

Der technische Geltungsbereich umfasst den gesamten Lebenszyklus gemäss Europäischer Norm EN 15643-5⁷. Dieser beinhaltet die *Herstellungsphase der Baustoffe* (Module A1 bis A3), die *Errichtungsphase des Bauwerks* (Module A4 und A5), die *Nutzungsphase des Bauwerks* (Module B1 bis B4) sowie die *Entsorgungsphase* (Module C1 bis C4) einer definierten Strassenbauweise. Es werden keine Vorteile und Belastungen (Modul D) ausserhalb der Systemgrenzen berücksichtigt. In jeder Phase werden all jene Parameter eruiert, die einen relevanten Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Strassenbauweise hinsichtlich der betrachteten Wirkungsabschätzungsmethoden haben könnten.

Von wesentlicher Bedeutung ist das Verständnis über den holistischen Bewertungsrahmen.

⁷ Europäische Norm EN 15643-5, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken - Teil 5 Leitfaden zu den Grundsätzen und den Anforderungen an Ingenieurbauwerke, 2018.

Jede Aktivität (vom Bau über die Erhaltung bis zum Abbruch / Recycling) aber auch die durch die Erhaltungsmassnahmen (positiv oder negativ) beeinträchtigte Nutzung des Strassenoberbaus spielen eine zentrale Rolle und können mit dem SABINA-Bilanzrechner technisch, ökologisch, ökonomisch und / oder aus sozialer Sicht bewertet werden.

Die nachfolgende Liste gibt einen Überblick, über den im Rahmen von SABINA definierten technischen Geltungsbereich:

- Materialflüsse:
 - Wahl Bauweise und Baustoffe und Bindemittel
 - Materialgewinnung/Materialaufbereitung
 - Transport
 - Einbau
 - Ausbau, Transport
 - Wiederverwendung/Recycling, thermische Verwertung, Deponierung
- Nutzung und Erhaltung:
 - Generalerneuerung
 - Instandhaltung (Unterhalt)
 - Instandsetzung
 - Teilerneuerung
 - Ausbau, Wiederverwendung/Recycling, thermische Verwertung, Deponierung
- Nutzerinnen- und Kundinnenansprüche
 - Auswirkungen der baulichen Massnahmen auf die Bilanz durch einen verbesserten Zustand und die Verlängerung der technischen Nutzungsdauer, reduzierte Emissionen, etc.
 - Auswirkungen der Erhaltungsmassnahmen auf den Verkehrsfluss während der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen (Dauer und Häufigkeit)

2.3 Geographischer Geltungsbereich

Der geographische Geltungsbereich umfasst die standardisierten Oberbaukonstruktionen folgender Länder:

- Deutschland
- Österreich
- Schweiz

Das jeweilige Land kann direkt im SABINA-Bilanzrechner im Rahmen der Dateneingabe ausgewählt werden, wodurch sich die entsprechenden Hintergrunddaten selbstständig anpassen. Bei der Auswahl eines Landes werden automatisch die Schichtbezeichnungen bzw. nationalen Oberbauweisen gemäss den landestypischen Bemessungskatalogen ausgewählt.

2.4 Zielgruppe der Anwendung

Die Zielgruppe der Anwendung des SABINA-Bilanzrechners sind die Auftraggeberinnen des Projekts SABINA, die nationalen Strassenverwaltungen in Deutschland, Österreich und der Schweiz auf technischer Ebene. Unter Bezugnahme auf die Zielsetzungen, Möglichkeiten und die zuvor beschriebenen Anwendungsbereiche, ergeben sich folgende Anwenderinnen für den SABINA-Bilanzrechner:

- Erhaltungsexpertinnen im Bereich des strategischen Erhaltungsmanagements (Pavement/Asset Management Verwaltungseinheit)
- Fachingenieurinnen im Bereich der Vorbereitung und Detailplanung von Erhaltungsprojekten im Bereich Strassenoberbau
- Fachingenieurinnen im Bereich Vergabe und Ausschreibung von Erhaltungsprojekten im Bereich Strassenoberbau

Die Arbeit mit dem SABINA-Bilanzrechner setzt entsprechende Fachkenntnisse und -kompetenzen der Anwenderin im Bereich der Strassenbautechnik, zu Strassenbefestigungen und zum Lebenszyklusmanagement von Strasseninfrastrukturen voraus. Die Algorithmen des SABINA-Bilanzrechners und die Annahmen der Modellierung sollten von der Anwenderin nachvollzogen werden können (siehe hierzu SABINA-Schlussbericht und Benutzungshandbuch). Im Rahmen der Implementierung werden entsprechende Schulungen empfohlen (siehe Kapitel 4.3).

3 EINGANGSDATEN UND DATENGRUNDLAGEN

3.1 Eingangsdaten

Um den SABINA-Bilanzrechner verwenden zu können, ist es zuvor erforderlich, die notwendigen Eingangsdaten aufzubereiten. Welche Informationen im Detail hierfür notwendig sind, kann dem SABINA Schlussbericht bzw. dem Benutzungshandbuch entnommen werden. Aus Gründen der Vollständigkeit wird hier ein Überblick gegeben:

- Allgemeine Eingangsdaten
 - Allgemeine bauliche Informationen zum Strassenabschnitt (Länge, Breite, Anzahl Fahrstreifen etc.)
 - Verkehrsbelastung (Verkehrsstärke) mit aktuellen Verkehrszahlen, Aufteilung auf die Fahrzeugkategorien (PKW, LKW und E-PKW) sowie entsprechende Zuwachsraten
- Detaillierte Daten des Verkehrs und des Fahrzeugkollektivs (Verkehrsdaten)
 - Massgebende Tagesganglinie (als Vorlage verfügbar)
 - Informationen zum Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch je Fahrzeugkategorie (als Vorlage verfügbar)
 - Funktionaler Zusammenhang Verbrauch und Längsebenheit (als Vorlage verfügbar)
 - Generelle Baustelleninformationen (Staugeschwindigkeit und Dauer Baustelleneinrichtung)
 - Wirtschaftlichkeitsparameter
- Massnahmen innerhalb des Lebenszyklus (jeweils für die Basisvariante und die Vergleichsvariante)
 - Allgemeines
 - Informationen zur technischen Nutzungsdauer (Art, Jahr, Dauer bis zur nächsten Massnahme)
 - Kosten der Erhaltungsmassnahme
 - Spezifische Baustelleninformationen (Kapazität während Massnahme, Anzahl Fahrstreifen etc.)
 - Zustandsinformationen (Längsebenheit) vor und nach Massnahme
 - Daten zur Entsorgung von Bestandsschichten
 - Daten zur Herstellung der Materialien für die neuen Schichten
 - Daten zur Errichtung der neuen Schichten

3.2 Öko-Datenbanken

Von zentraler Bedeutung für den praktischen Einsatz des SABINA-Bilanzrechners sind die Öko-Datenbanken, welche die entsprechenden Kennzahlen zu den Baustoffen und Prozessen beinhalten. Im Projekt SABINA werden folgenden Datenbanken genutzt:

- **Ecoinvent** für Deutschland und Österreich
- **UVEK-Datenbank** für die Schweiz

Dabei handelt es sich um umfassend qualitätsgesicherte Datenbanken. Beide Datenbanken werden sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene verwendet und bilden die Grundlage für viele Forschungsprojekte. Die aus diesen beiden Datenbanken in den SABINA-Bilanzrechner übertragenen Daten können dem elektronischen Anhang entnommen werden.

Die Nutzung dieser Daten im Rahmen des Projekts SABINA ist zulässig. Hinweise für die weiterführende Nutzung dieser Öko-Daten können für die Ecoinvent-Datenbank der Website www.ecoinvent.org entnommen werden, für die UVEK-Datenbank geben die Auftragnehmerinnen Auskunft.

3.3 Datenaktualisierung und -anpassung

Die erforderlichen Daten wurden aus den oben erwähnten Öko-Datenbanken in die Datenbank des SABINA-Bilanzrechners mit Stand Januar 2025 importiert und stehen für die Analysen zur Verfügung.

Unter Bezugnahme auf die vertraglichen Vereinbarungen werden die Daten des SABINA-Bilanzrechners von den Auftragnehmerinnen über einen Zeitraum von 2 Jahren gewartet. Eine Aktualisierung der Daten durch die Auftragnehmerinnen ist für Januar 2027 terminiert. Die Auftraggeberinnen werden über die Aktualisierung informiert und die aktuellen Daten werden in elektronischer Form (entsprechend den Vorgaben im Anhang) übermittelt.

Die Administrationsfunktion des SABINA-Bilanzrechners erlaubt sowohl das Herunterladen von implementierten Daten als auch das Hochladen von neuen Daten. Für den Zeitraum der Bereitstellung des SABINA-Bilanzrechners über die Website der Auftragnehmerinnen bleiben die Zugriffsrechte für den Administrationsbereich ausschliesslich bei den Auftragnehmerinnen. Dies stellt sicher, dass nur nach erfolgter validierter Qualitätsprüfung der Daten neue Daten hochgeladen werden. Somit ist es auch nicht möglich, dass durch Anwenderinnen Daten ausgetauscht werden und Berechnungsergebnisse bei Neuberechnung ungewollt andere Werte liefern.

Grundsätzlich besteht die technische Möglichkeit, jeden *qualitätsgesicherten* Öko-Kennwert in die SABINA-Datenbank zu implementieren. Aufgrund der Notwendigkeit ausschliesslich qualitätsgesicherte Werte zu verwenden und so eine notwendige Qualität der Ergebnisse sicher zu stellen (auch im Hinblick auf die Vergleichbarkeit), werden nur jene Werte übernommen, die den Qualitätskriterien der Ecoinvent-Datenbank (Deutschland und Österreich) bzw. der UVEK-Datenbank (Schweiz) entsprechen. Die entsprechenden Anforderungen befinden sich im Anhang zum Implementierungsleitfaden. Eine entsprechende fachliche Unterstützung für die Übernahme bzw. Adaptierung von neuen *nationalen* Öko-Kennwerten wird während des Zeitraums der Bereitstellung des SABINA-Bilanzrechners in der Wartungsphase gegeben, wobei die Überprüfung der Qualität solcher Daten nicht im Rahmen der Wartung des SABINA-Bilanzrechners erfolgen kann (insbesondere bei Quellen, die nicht den Standards nach Ecoinvent oder UVEK entsprechen).

4 PRAKTISCHE UMSETZUNG

4.1 Grundlagen und Ergebnisse

Von den Auftragnehmerinnen werden folgende Grundlagen zur praktischen Anwendung des SABINA-Bilanzrechners bereitgestellt:

- Theoretische Grundlagen der holistischen Lebenszyklusanalyse (Modelle und Algorithmen, Beschreibung der Eingangsdaten etc.) für den technischen Geltungsbereich in dokumentierter Form (siehe SABINA Schlussbericht)
- Implementierung der Modelle und Algorithmen in den webbasierten SABINA-Bilanzrechner in Form eines gehosteten Prototyps
- Bereitstellung des Source-Codes des SABINA-Bilanzrechners (elektronischer Anhang zum SABINA-Schlussbericht) für eine mögliche Implementierung in die IT-Umgebung einer Strassenverwaltung; Bereitstellung der im Rahmen des Projekts entwickelten elektronischen Berechnungsalgorithmen (Python-Codes)
- Implementierungsleitfaden zum SABINA-Bilanzrechner (Anhang zum SABINA-Schlussbericht)
- Benutzungshandbuch des SABINA-Bilanzrechners (Anhang zum SABINA-Schlussbericht)

4.2 Möglichkeiten der Verwendung des SABINA-Bilanzrechners

Für die praktische Anwendung des SABINA-Bilanzrechners stehen für die Auftraggeberinnen zwei Optionen zur Verfügung:

1. Nutzung des SABINA-Bilanzrechners auf der Website der Auftragnehmerinnen
2. Implementierung des SABINA-Bilanzrechners in die eigene IT-Umgebung der Strassenverwaltung

4.2.1 Online-Nutzung des SABINA-Bilanzrechners

Gemäss den vertraglichen Vereinbarungen steht für eine Dauer von 2 Jahren nach Projektabschluss der SABINA-Bilanzrechner auf einer Website der Auftragnehmerinnen mit allen notwendigen Funktionen zur Durchführung von Analysen zur Verfügung. Diese webbasierte Lösung wird gewartet und die Daten der Öko-Kennwerte werden im Januar 2027 aktualisiert (siehe Kapitel 3.3).

Die Auftragnehmerinnen unterstützen die Auftraggeberinnen bei der Inbetriebnahme des SABINA-Bilanzrechners und übermitteln die notwendigen Login-Daten.

Für das Anlegen von Anwendungsprofilen steht im Administrationsbereich des SABINA-Bilanzrechners entsprechende Funktionen zur Verfügung. Für den Zeitraum der Bereitstellung des SABINA-Bilanzrechners über die Website der Auftragnehmerinnen bleiben die Zugriffsrechte für diesen Administrationsbereich aus verwaltungstechnischen Gründen ausschliesslich bei den Auftragnehmerinnen.

Die Einrichtung von Anwendungsprofilen erfolgen ohne die Angabe von personenbezogenen Daten im Einklang mit der Datenschutz-Grundverordnung. Die Verantwortung über die Weitergabe der Anwendungsberechtigung obliegt den Auftragnehmerinnen. Falls weitere oder geänderte Anwendungsprofile erforderlich sind, können diese in Absprache mit den Auftragnehmerinnen festgelegt werden.

4.2.2 Implementierung des SABINA-Bilanzrechners in eine IT-Umgebung

Alternativ zur Nutzung des SABINA-Bilanzrechners auf der Website der Auftragnehmerinnen steht den Auftraggeberinnen auch die Möglichkeit zur Verfügung, den SABINA-Bilanzrechner in die eigene IT-Umgebung zu übernehmen. Der für eine Implementierung erforderliche Source-Code wird den Auftragnehmerinnen entsprechend der vertraglichen Vereinbarung vollumfänglich zur Verfügung gestellt (siehe elektronischer Anhang zum Schlussbericht). Dies beinhaltet auch die in den SABINA-Bilanzrechner implementierten Daten (aus den jeweiligen Öko-Datenbanken extrahiert). Diese können dem elektronischen Anhang zum Implementierungsleitfaden entnommen werden.

Bei der Implementierung des SABINA-Bilanzrechners in die IT-Umgebung einer Auftragnehmerin ist folgendes zu beachten:

- Die Verantwortlichkeit zur Wartung, Erweiterung und Aktualisierung der Öko-Daten geht über zur Auftraggeberin.
- Sämtliche Anpassungen des Source-Codes und damit verbundenen möglichen Änderungen in den Berechnungen liegen in der Verantwortlichkeit der Auftraggeberin.
- Die Wartung eines in die IT-Umgebung einer Auftraggeberin implementierten Source-Codes ist im Rahmen der Wartungsphase zum Projekt nicht möglich und somit ausgeschlossen. Sollten dennoch Erläuterungen zum Original-Source-Code notwendig werden, kann dies bilateral im Rahmen der Wartung erfolgen.

Im Rahmen der Implementierung des Source-Codes des SABINA-Bilanzrechners in die IT-Umgebung der Auftraggeberin wird auf folgende Punkte explizit hingewiesen:

- **Server-Infrastruktur:** Die IT-Umgebung sollte ausreichend leistungsfähige Server (physisch oder Cloud-basiert) bereitstellen, die Lastspitzen abfangen können.
- **Datenbank-Performance und Kompatibilität:** Da der SABINA-Bilanzrechner auf umfangreiche Hintergrunddaten zugreift, muss die IT-Umgebung eine schnelle, zuverlässige und kompatible Datenbanklösung bereitstellen. Zur Verwaltung und Abfrage von relationalen Datenbanken wird die Anwendung der Standardsprache SQL (Structured Query Language) empfohlen.
- **Netzwerkanbindung und Bandbreite:** Eine stabile und schnelle Internet- oder Intranet-Verbindung ist essenziell, da Anwenderinnen webbasiert auf die Anwendung zugreifen.
- **IT-Sicherheit und Zugriffskontrolle:** Der SABINA-Bilanzrechner unterstützt sensible Projektdaten, die entsprechend geschützt werden müssen. Notwendig sind u. a. eine verschlüsselte Datenübertragung (TLS/SSL), Rollen- und Rechtekonzepte für Anwenderinnen sowie die Anwendung der jeweiligen nationalen bzw. organisatorischen Sicherheitsstandards.
- **Datenschutz und Compliance:** Falls personenbezogene Daten verarbeitet werden (z. B. bei Zuordnung von Projekten zu Anwenderinnen), muss die Umgebung die Datenschutz-Grundverordnung einhalten.
- **Interoperabilität und Schnittstellen:** Aus den Bearbeitungsprozessen kann die Notwendigkeit entstehen, dass der SABINA-Bilanzrechner Daten aus bestehenden Managementsystemen abfragt bzw. verwendet. Daher ist gegebenenfalls eine IT-Umgebung notwendig, die es verschiedenen Softwareanwendungen ermöglicht, miteinander zu kommunizieren und Daten auszutauschen. Application Programming Interfaces (APIs) definieren, wie standardisierte Datenaustauschformate verarbeitet werden, damit die Funktionalitäten verschiedener Programme untereinander zur Verfügung gestellt werden können.
- **Rechenkapazitäten für Analysen:** Die IT-Umgebung sollte ausreichende Rechenleistung und Speicherkapazitäten bieten, um Analysen performant durchzuführen.

- Backup und Recovery: Um Datenverlust zu vermeiden, sollten regelmässige Backups (Datenbanken, Konfigurationen, Nutzerinnenprojekte) automatisiert erfolgen.

Für die Implementierung des SABINA-Bilanzrechners in die IT-Umgebung einer Strassenverwaltung wird empfohlen, ein eigenes IT-Implementierungsprojekt zu definieren und auch die hierfür notwendigen Unterlagen zu erstellen, beispielsweise:

- Projekt- und Anforderungsdokumente
 - Lasten- und Pflichtenheft
 - Projektplan (Zeitplan, Meilensteine, Verantwortlichkeiten und Ressourcenplanung).
- Technische Dokumentation
 - Systemarchitektur-Dokumentation
 - Infrastruktur- und Deployment-Dokumentation
 - Schnittstellendokumentation
- Sicherheits- und Compliance-Dokumente
 - IT-Sicherheitskonzept
 - Datenschutz-Folgenabschätzung
 - Rollen- und Rechtekonzept
- Betriebs- und Supportdokumentation
 - Betriebshandbuch
 - Notfall- und Wiederherstellungsplan
 - Change-Management-Dokumentation
- Schulung und Anwendungsunterlagen
 - Benutzungshandbuch
 - Administrationshandbuch
 - Schulungskonzepte
- Qualitätssicherungsunterlagen
 - Testkonzept und Testprotokolle
 - Abnahmeprotokolle

4.3 Schulungen

Eine wesentliche Voraussetzung für eine effiziente Verwendung des SABINA-Bilanzrechners liegt auch in der Schulung von Anwenderinnen. Es werden zwei Arten von Schulungen empfohlen:

1. Grundlagenschulungen zur Erläuterung und Erklärung der Modelle und Algorithmen, die im Rahmen der Berechnungen des SABINA-Bilanzrechners verwendet werden
2. Anwenderinnenschulungen für die praktische Benutzung des SABINA-Bilanzrechners

Eine wesentliche Voraussetzung für die effiziente Durchführung von Schulungen sind die unter Kapitel 2.4 beschriebenen Anforderungen an die fachliche Kompetenz der Anwenderinnen.

Es wird empfohlen, zumindest die Grundlagenschulungen im Rahmen von Fachworkshops abzuhalten und die hierfür notwendigen Schulungsunterlagen aus den zur Verfügung stehenden Dokumentationen zu extrahieren.

Im Rahmen der Wartungsphase werden keine Schulungen angeboten, können jedoch von den Auftragnehmerinnen gesondert beispielsweise als Erweiterung zum Projekt SABINA angeboten werden.

4.4 Prozesse nach Implementierung

Die Implementierung des SABINA-Bilanzrechners kann eine wesentliche Erweiterung der bestehenden Prozesse der Strassenverwaltung zur Lebenszyklusbewertung des Strassenoberbaus darstellen, beispielsweise im Pavement Management auf strategischer und operativer Ebene. Nach der Implementierung ist es notwendig, weitere Schritte zu setzen, die sich auf verschiedene Anwendungsbereiche beziehen, eine laufende Verwendung der Ergebnisse der Analysen anstreben und wie folgt zusammengefasst werden können:

- Laufende oder periodische Aktualisierung der Öko-Daten und Informationen für die Analysen (gegebenenfalls im Zusammenhang mit dem Aufbau und der Implementierung einer nationalen Öko-Datenbanklösung)
- Laufende Verbesserung der Datenqualität zur Erhöhung der Aussagegenauigkeit
- Laufende Verbesserung der Modelle auf der Grundlage eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses und einer kontinuierlichen kritischen Bewertung der Ergebnisse
- Periodische Evaluierung und Bewertung der Prozesse vor dem Hintergrund der Erfüllung der Zielvorgaben
- Evaluierung von möglichen Erweiterungen und Ergänzung aufgrund von aktualisierten Prozessen im Lebenszyklusmanagement

4.5 Risiko der Implementierung

Noch bevor die ersten Implementierungsschritte gemacht werden, wird empfohlen, eine Analyse des Implementierungsrisikos im Bereich des Lebenszyklusmanagements und im Bereich der Systemanwendung vorzunehmen. Dabei sind zumindest folgende Bereiche in die Untersuchung einzubeziehen:

- Datenverfügbarkeit und Datenqualität
- Aufwendungen zur Sammlung und Aktualisierung der Daten und Informationen
- Abweichung der Anforderungen von den Ergebnissen bei der praktischen Anwendung
- Abgrenzung des Anwendungsbereichs der Zielsetzungen vor dem Hintergrund der Erwartungen der unterschiedlichen Anwenderinnen
- Erforderliches Basiswissen der im Rahmen der Implementierung und praktischen Anwendung beteiligten Anwenderinnen
- Zielerfüllungsgrad der Softwarelösung
- Praktische Anwendbarkeit der Softwarelösung

Jeder hier aufgelistete Risikobereich sollte zumindest diskutiert werden und gegebenenfalls mit entsprechenden Risikobewertungsverfahren (z. B. Risikomatrix) evaluiert werden. Darauf aufbauend sind die entsprechenden Schritte zur Minimierung des Risikos zu planen und im Rahmen der Implementierung umzusetzen.



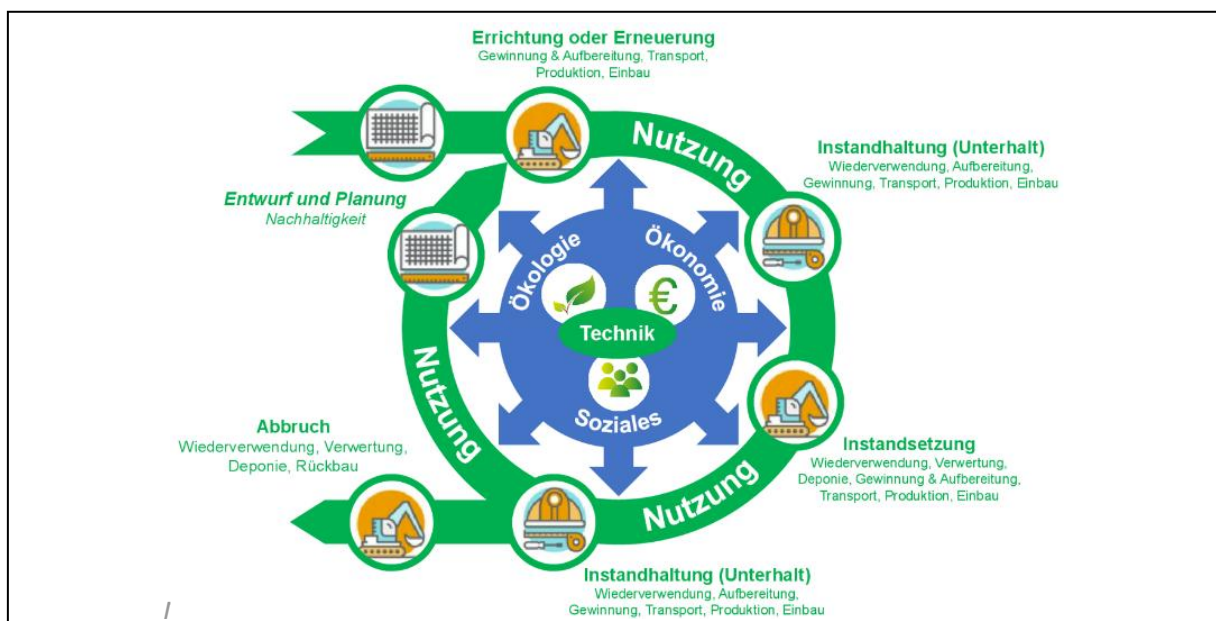
ANHANG B: BENUTZUNGSHANDBUCH

Benutzungshandbuch des SABINA-Bilanzrechners

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
D-A-CH Kooperation

Verkehrsinfrastrukturforschung 2022

D-A-CH 2022



Januar 2026

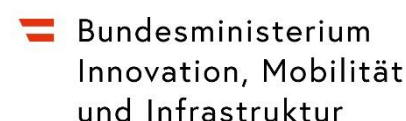
Impressum

Programmerstellung und -finanzierung der D-A-CH Kooperation:

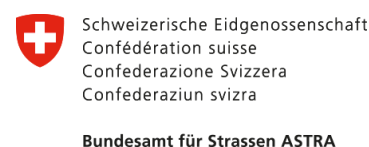
Bundesministerium für Verkehr (BMV)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland



Bundesministerium für Innovation, Mobilität und
Infrastruktur (BMIMI)
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich



Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Papiermühlestrasse 13
3063 Ittigen
Schweiz



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich



Für den Projektinhalt verantwortlich:

Umtec Technologie AG
Eichtalstrasse 54
8634 Hombrechtikon, Schweiz



Technische Universität-Braunschweig
Institut für Straßenwesen
Beethovenstraße 51 b
38106 Braunschweig, Deutschland



Hochschule Campus Wien – University of Applied Sciences
Department Bauen und Gestalten
Favoritenstraße 226
1100 Wien, Österreich



SABINA

Strassenbauweisen Bilanzierung Nachhaltigkeit

D-A-CH 2022

Auftragnehmer

Umtec Technologie AG, Schweiz

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Deutschland

Hochschule Campus Wien, Department Bauen und Gestalten, Österreich

Autorinnen und Autoren

Thomas POHL, MSc.

Dr. Alfred WENINGER-VYCUDIL

Univ.-Prof. Dr. Michael P. WISTUBA

DIⁱⁿ Nina SAM

Dominik OSTERWALDER, MSc.

Nick SPITZHOFFER, BSc.

Auftragnehmerinnen:

Umtec Technologie AG, Schweiz

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Deutschland

Hochschule Campus Wien, Department Bauen und Gestalten, Österreich

Inhalt

Anhang B: Benutzungshandbuch.....	1
1 Einleitung	7
1.1 Zweck dieses Benutzungshandbuchs.....	7
1.2 Umfang und Systemüberblick.....	7
1.3 Allgemeine Bedienungshinweise	8
2 Systembeschreibung.....	10
2.1 Startseite	10
2.2 Anlegen eines Projekts.....	10
2.3 Eingangsdaten	11
2.3.1 Allgemeine Informationen.....	11
2.3.2 Richtungsfahrbahn	12
2.3.3 Richtungsverkehr	12
2.4 Verkehrsdaten	12
2.4.1 Relative Tagesganglinie	12
2.4.2 Kraftstoff- und Energieverbrauch.....	13
2.4.3 Funktionaler Zusammenhang Verbrauch und Ebenheit.....	14
2.4.4 Baustelleninformationen	15
2.4.5 Wirtschaftlichkeitsparameter.....	15
2.5 Massnahmen.....	15
2.5.1 Basisvariante und Vergleichsvariante.....	16
2.5.2 Allgemeines.....	16
2.5.3 Entsorgung (Module C1 bis C4)	18
2.5.4 Herstellung (Module A1 bis A3).....	19
2.5.5 Errichtung (Module A4 bis A5).....	21
2.6 Ergebnisse	23
2.6.1 Bilanzierungsmethoden	24
2.6.2 Ökonomische Bewertung	24
2.6.3 Ökologische Bewertung.....	25
2.6.4 Langfristige Ökologie.....	27
2.6.5 Exportieren der Ergebnisse	28
2.7 Einstellungen.....	28
2.7.1 Verkehrsdaten.....	29
2.7.2 Produktivität	29
2.7.3 Geplante Erweiterung <i>Eigene Rezepturen</i>	30
3 Hinweise zu berechnungs- und EingabeFehlern	33

3.1	Berechnungsfehler	33
3.2	Fehlerhafte und unvollständige Eingaben.....	33
3.3	Bautechnische Hinweise bei der Eingabe.....	34

Hinweise zu Schreibweisen

Entgegen der Rechtschreibung in Deutschland und Österreich wird in der Schweiz das „ß“ generell durch „ss“ ersetzt, also auch nach langen Vokalen und Diphthongen. In diesem Bericht ist die schweizerische Schreibweise übernommen, der Buchstabe „ß“ wird nur bei Eigennamen und bei nationalen Quellenbezeichnungen beibehalten.

In diesem Bericht wird der Dezimalpunkt anstelle des Dezimalkommas verwendet, wie dies in einigen Schweizer Kantonen üblich ist.

In Bezug auf die gendergerechte Schreibweise wird in diesem Bericht zur besseren Lesbarkeit stets das generische Femininum verwendet. Die feminine Form bezieht sich nicht nur auf Frauen, sondern auf Personen aller Geschlechter.

1 EINLEITUNG

1.1 Zweck dieses Benutzungshandbuchs

Dieses Benutzungshandbuch begleitet die Anwenderinnen bei der Nutzung des SABINA-Bilanzrechners, der im Rahmen des länderübergreifenden Forschungsprojekts SABINA im Auftrag der Strassenverwaltungen der D-A-CH-Länder (Deutschland, Österreich und Schweiz) entwickelt wurde (siehe SABINA Schlussbericht).

Zum Anwendungsbereich des SABINA-Bilanzrechners und zur Zielgruppe der Anwenderinnen inklusive deren notwendigen Fachkompetenzen siehe SABINA Schlussbericht, Kapitel 1.

Zum Geltungsbereich des SABINA-Bilanzrechners und zum Untersuchungsgegenstand siehe SABINA Schlussbericht, Kapitel 4.

1.2 Umfang und Systemüberblick

Der SABINA-Bilanzrechner stellt einen Prototyp dar, der zur Erstellung von vergleichenden ökonomischen, ökologischen und sozio-ökologischen Lebenszyklusbewertungen verwendet wird.

Der SABINA-Bilanzrechner ist in mehrere Ebenen strukturiert. Die oberste Ebene bilden die Registerkarten

- Eingangsdaten,
- Verkehrsdaten,
- Massnahmen und
- Ergebnisse.

In der Registerkarte *Eingangsdaten* werden projektspezifische Daten eingegeben, wie Informationen über den betrachteten Strassenabschnitt und Kennzahlen über den vorhandenen Verkehr. Die Registerkarte *Verkehrsdaten* dient zur Definition von spezifischen Verkehrs- und Fahrzeugflotteninformationen (relative Tagesganglinie, Kraftstoff- und Energieverbrauch der Verkehrsflotte). In der Registerkarte *Massnahmen* werden die Baumassnahmen des Lebenszyklus definiert. Dabei wird eine Basis- und eine Vergleichsvariante eingegeben. Die Registerkarte *Ergebnisse* stellt die Ergebnisse der Berechnungen übersichtlich dar. Die *Basisvariante* und die *Vergleichsvariante* werden einander gegenübergestellt und in eine ökonomische sowie eine ökologische Bewertung unterteilt.

In den Registerkarten ist die Dateneingabe in Blöcke unterteilt, die in Kapitel 2 detailliert erläutert werden. Abbildung 1 zeigt überblicksmäßig die Ebenen und die Navigation im SABINA-Bilanzrechner.

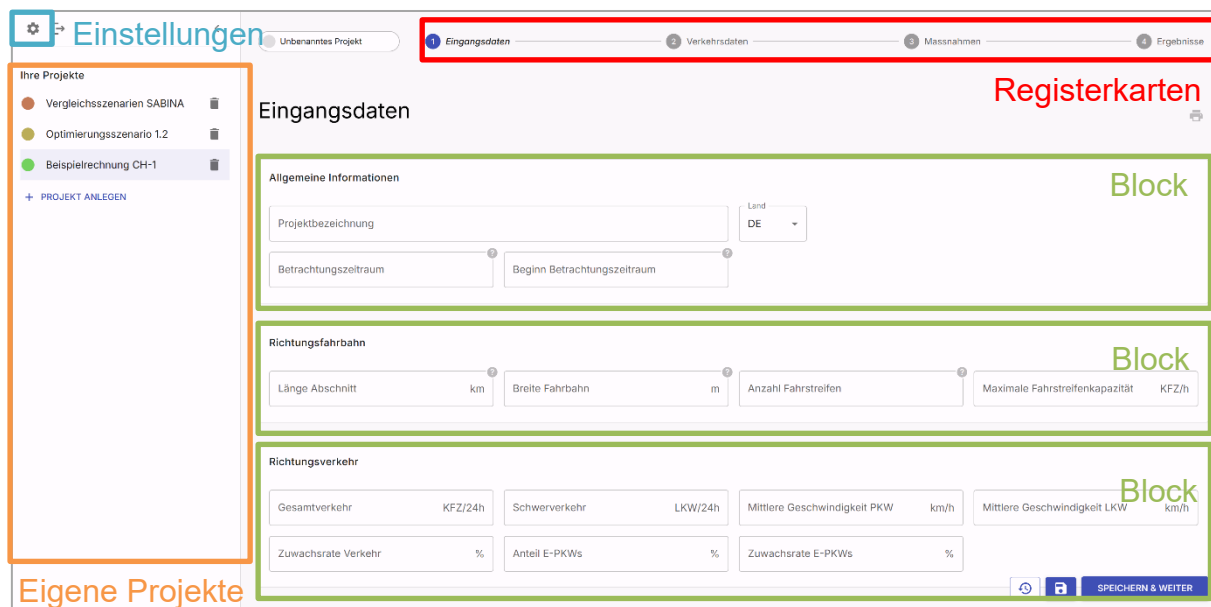


Abbildung 1: Systemüberblick des SABINA-Bilanzrechners

1.3 Allgemeine Bedienungshinweise

Folgende allgemeine Bedienungshinweise sind zu beachten:

Voraussetzungen:

Eine durchgehende Internetverbindung ist Voraussetzung für den Betrieb des SABINA-Bilanzrechners, da das System nicht für den Offline-Betrieb ausgelegt ist.

Navigation:

Der SABINA-Bilanzrechner bietet eine intuitive Navigation zwischen den verschiedenen Registerkarten. Es kann mithilfe der Tab-Taste zwischen den Eingabefeldern navigiert werden, um eine schnelle und effiziente Bedienung zu gewährleisten. Beim Speichern der Eingaben stehen zwei Optionen zur Verfügung: *Speichern* speichert die Änderungen und bleibt auf der aktuellen Seite, während *Speichern und Weiter* die Eingaben speichert und automatisch zur nächsten Registerkarte weiterleitet.

Ländereinstellungen:

Es ist zu beachten, dass bei der Eingabe von Zahlen die Verwendung von Komma und Punkt je nach Ländereinstellung variieren kann. In Österreich und Deutschland wird das Komma als Dezimaltrennzeichen verwendet (z. B. 1,5), während in der Schweiz der Punkt als Dezimaltrennzeichen zur Anwendung gelangt (z. B. 1.5). Die Eingabe muss dem Format entsprechen, das in den Länder- und Regionseinstellungen des Systems bzw. des verwendeten Webbrowsers festgelegt ist. Die Website verarbeitet die Daten basierend auf den regionalen Einstellungen des Geräts unabhängig davon, ob ein einzugebendes Projekt z.B. der Schweiz zugeordnet wird.

Bedienungshinweise:

In der Eingabemaske sind verschiedene Symbole integriert, die die Anwenderin bei der Dateneingabe unterstützt:

- **Fragezeichen-Symbole (?)**

Neben einzelnen Eingabefeldern sind Fragezeichen-Symbole platziert. Wenn der Mauszeiger darüber bewegt wird, erscheinen zusätzliche Informationen oder Hilfstexte. Diese geben Hinweise zur korrekten Eingabe oder erläutern die Bedeutung der jeweiligen Felder (z. B. Aktuelles Jahr: Geben Sie das aktuelle Jahr an (im Format 20xx)).

- **Drucker-Symbol ()**

Das Drucker-Symbol oben rechts ermöglicht es, die aktuelle Ansicht zu drucken oder als PDF-Datei zu speichern. Damit können die eingegebenen Daten und Einstellungen dokumentiert oder archiviert werden.

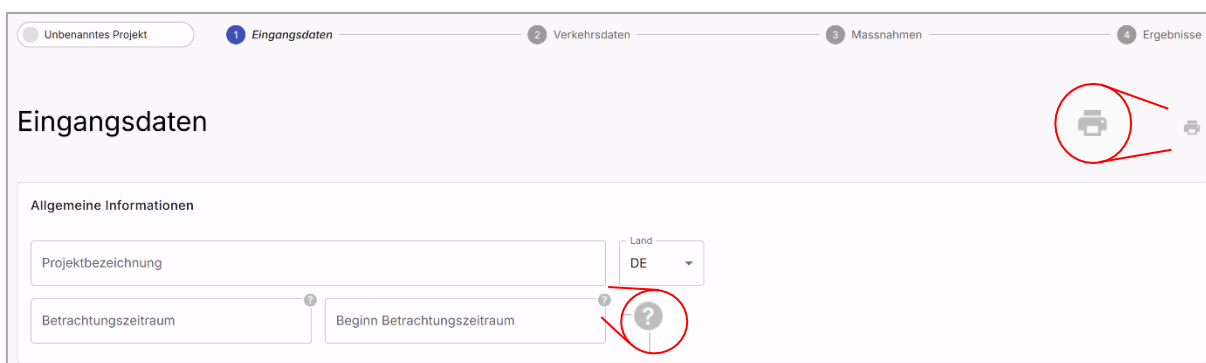


Abbildung 2: Symbole in der Eingabemaske

2 SYSTEMBESCHREIBUNG

2.1 Startseite

Die Startseite des SABINA-Bilanzrechners bietet eine kurze Beschreibung der Software sowie einen weiterführenden Link zum Download des SABINA Schlussberichts, der die Grundlagen beschreibt und weiterführende Informationen bereitstellt. Weiters wird die aktuelle Version angezeigt. Dieses Benutzungshandbuch bezieht sich auf die Version 0.8.0 des SABINA-Bilanzrechners.

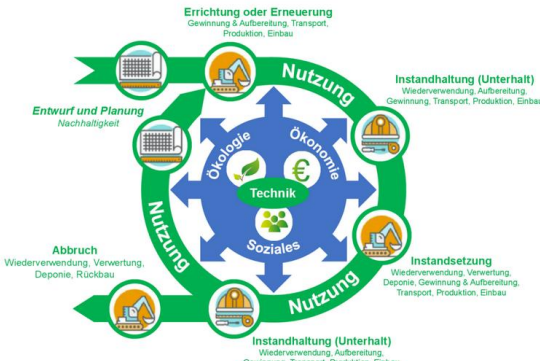
Für die Anmeldung wird ein User-name und ein Passwort benötigt. Die Zugangsdaten werden aus verwaltungstechnischen Gründen ausschliesslich auf Anfrage von den Auftraggeberinnen ausgestellt.

SABINA

Online-Bilanzrechner

SABINA stellt einen umfassenden Rahmen zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Strassenbefestigungen bereit. Dieser bewertet Strassenkonstruktionen (Ober- und Unterbau) hinsichtlich Umwelt, Technik, Wirtschaft und Gesellschaft, wobei der Fokus auf Treibhauspotenzial, Energieverbrauch und Dauerhaftigkeit liegt. Der gesamte Lebenszyklus inklusive Ausbau, Wiederverwendung und Nutzeremissionen wird berücksichtigt.

Projektbericht und Leitfaden: <https://projekte.tfg.at/projekt/4556873>
Version: 0.8.0



Anmelden

ANMELDEN

Abbildung 3: Startseite des SABINA-Bilanzrechners

2.2 Anlegen eines Projekts

Nach dem Einloggen kann über das Feld + *Projekt anlegen* in der linken Navigationsspalte ein neues Projekt eröffnet werden. Danach werden im Block *Eingangsdaten* die notwendigen Informationen angegeben.

2.3 Eingangsdaten

In der Registerkarte *Eingangsdaten* werden projektspezifische Daten eingegeben (siehe nachfolgende Abbildung), die im Folgenden näher erläutert sind.

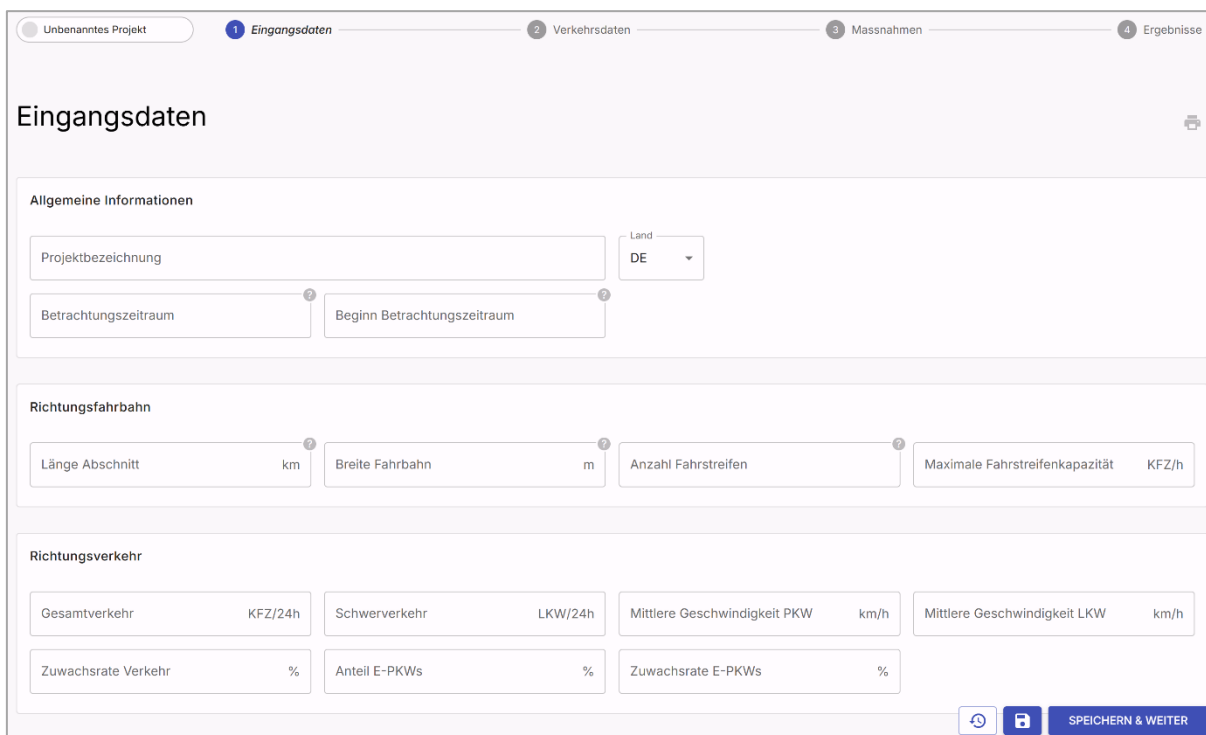


Abbildung 4: Übersicht der Registerkarte Eingangsdaten

2.3.1 Allgemeine Informationen

Im Block *Allgemeine Informationen* werden die Projektbezeichnung, das jeweilige Land, der Betrachtungszeitraum in Jahren sowie das aktuelle Jahr im Format 20xx eingegeben.

Achtung: Der Betrachtungszeitraum muss für die Basisvariante und die Vergleichsvariante identisch sein.

Basierend auf der Länderauswahl werden im Hintergrund automatisch die korrekten Regelwerke und Normen sowie die entsprechenden Oberbaukataloge mit standardisierten Straßenaufbauten und die länderspezifischen Materialbezeichnungen automatisch hinterlegt.

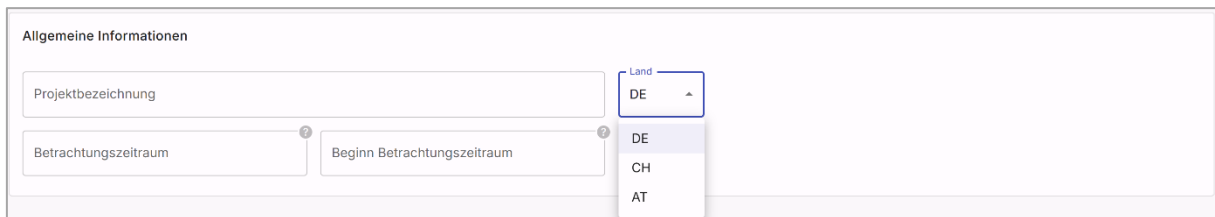


Abbildung 5: Block *Allgemeine Informationen*

2.3.2 Richtungsfahrbahn

Im Block *Richtungsfahrbahn* werden folgende projektspezifische Parameter definiert:

- Länge des betrachteten Abschnitts in [km]
- gesamte Breite der betrachteten Richtungsfahrbahn (inklusive der befestigten Seiten- und Randstreifen) in [m]
- Anzahl der Fahrstreifen pro Richtungsfahrbahn [-]
- maximale Fahrstreifenkapazität ohne Einschränkungen durch Baumassnahmen [KFZ/h]

2.3.3 Richtungsverkehr

Im Block *Richtungsverkehr* müssen alle Verkehrsdaten auf der betrachteten Strecke ohne Einschränkungen durch Baumassnahmen eingegeben werden:

- Gesamtverkehr (J)DTV [KFZ/24h]
- Schwerverkehr (J)DTLV [LKW/24h] (DTV^(SV) in Deutschland)
- Zuwachsrate des Verkehrs [%] (geometrischer Zuwachs!)
- Anteil der Personenkraftwagen mit E-Antrieb (E-PKWs) [%]
- Zuwachsrate E-PKWs [%] in Bezug zum Anteil der E-PKWs (geometrischer Zuwachs!)
- Mittlere Geschwindigkeit der PKWs [km/h]
- Mittlere Geschwindigkeit der LKWs [km/h]

2.4 Verkehrsdaten

2.4.1 Relative Tagesganglinie

Im Block *Relative Tagesganglinie* wird der prozentuale Anteil des täglichen Verkehrsaufkommens für jede Stunde des Tages eingetragen. Die Summe aller Stunden muss 100 % ergeben und soll den typischen Tagesverlauf abbilden. Der Verlauf der Tagesganglinie kann als Grafik angezeigt werden.

Es besteht die Möglichkeit, *Default-Werte* als Vorlage zu speichern und über den Button *aus Vorlage kopieren* aus der Vorlage einzufügen.

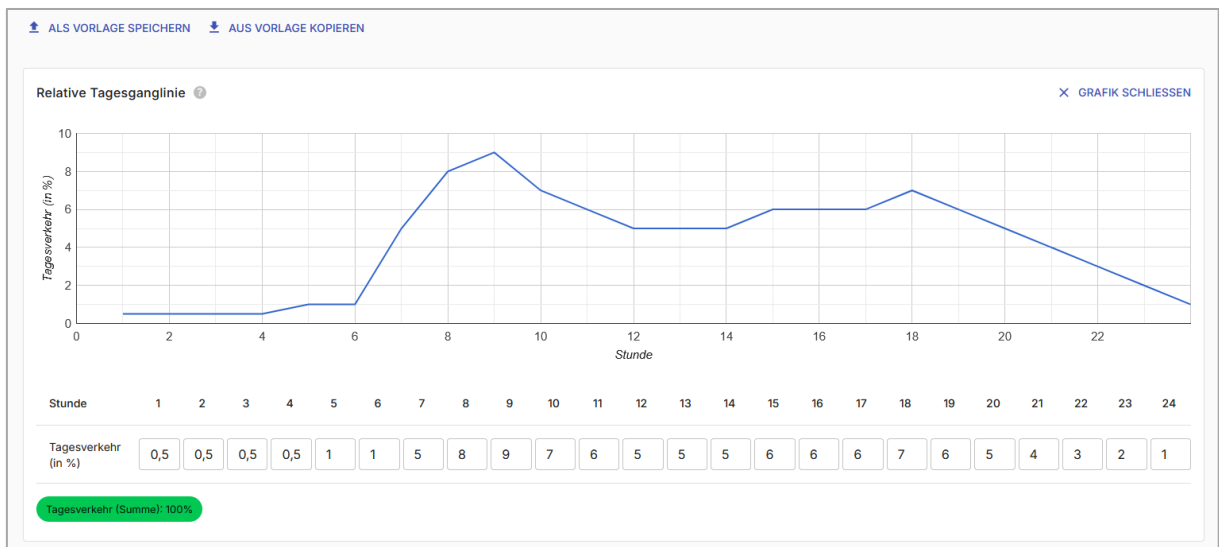


Abbildung 6: Tagesganglinie generiert durch die eingegebenen Prozentsätze

2.4.2 Kraftstoff- und Energieverbrauch

Im Block *Kraftstoff- und Energieverbrauch* wird der Kraftstoffverbrauch der PKWs und LKWs sowie der Energieverbrauch der E-PKWs für Geschwindigkeitsbereiche von 20 km/h in der Einheit l/100 km bzw. kWh/100 km angegeben. Die Werte können anschliessend als Grafik angezeigt werden (siehe nachfolgende Abbildung).

Kraftstoff- und Energieverbrauch GRAFIK ANZEIGEN

Fahrzeug	0-20 km/h	20-40 km/h	40-60 km/h	60-80 km/h	80-100 km/h	100-120 km/h	>120 km/h
Kraftstoffverbrauch PKW (in l/100km)	15	9	7	6	6	8	10,5
Kraftstoffverbrauch LKW (in l/100km)	55	40	31,5	25	32,5		
Energieverbrauch E-PKW (in kWh/100km)	20	16	14	12	14	17,5	21,5

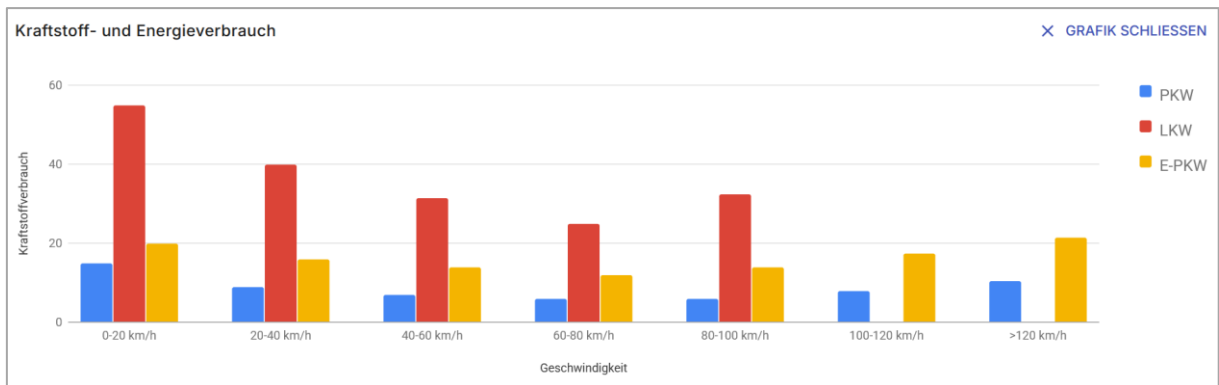


Abbildung 7: Block *Kraftstoff- und Energieverbrauch* inklusive grafischer Darstellung

2.4.3 Funktionaler Zusammenhang Verbrauch und Ebenheit

Der Treibstoffverbrauch von PKWs und LKWs wird in Abhängigkeit von der Strassenlängsebenheit (IRI-Wert) und der Geschwindigkeit erhöht. Dieser Zusammenhang lässt sich durch eine lineare Funktion beschreiben, die auf empirischen Daten basiert (siehe SABINA Schlussbericht). Die Parameter k und d beschreiben den linearen Zusammenhang zwischen Längsebenheit und zusätzlichem Treibstoff- bzw. Energieverbrauch. Die Anwenderin kann die linearen Funktionen an örtliche Randbedingungen anpassen.

Funktionaler Zusammenhang Verbrauch und Ebenheit (IRI)

PKW

k-Wert Funktion PKW 0-20 km/h

0,02

k-Wert Funktion PKW >20 km/h

0,03

d-Wert Funktion PKW 0-20 km/h

0,98

d-Wert Funktion PKW >20 km/h

0,97

LKW

k-Wert Funktion LKW 0-20 km/h

0,03

k-Wert Funktion LKW 20-60 km/h

0,05

k-Wert Funktion LKW 60-80 km/h

0,04

d-Wert Funktion LKW 0-20 km/h

0,97

d-Wert Funktion LKW 20-60 km/h

0,95

d-Wert Funktion LKW 60-80 km/h

0,96

Abbildung 8: Block *Funktionaler Zusammenhang Verbrauch und Ebenheit (IRI)*

Die Tabelle 16 zeigt Empfehlungen für die Modellparameter k und d zur Berechnung des Erhöhungsfaktors Treibstoff $EFT_{IRI,j,V}$, wobei der Erhöhungsfaktor auch für den zusätzlichen Energieverbrauch bei E-PKWs herangezogen werden kann. In der nachfolgenden Abbildung sind die Zusammenhänge graphisch dargestellt. Für detaillierte Informationen siehe SABINA Schlussbericht, Kapitel 6.1.4.3.

Tabelle 45: Modellparameter k und d für den Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch

Fahrzeugkategorie	Geschwindigkeitsbereich [km/h]	Modellparameter	
		k	d
Personenkraftwagen	[0 – 20]	0.02	0.98
	> 20	0.03	0.97
Lastkraftwagen	[0 – 20]	0.03	0.97
	[20 – 60]	0.05	0.95
	> 60	0.04	0.96

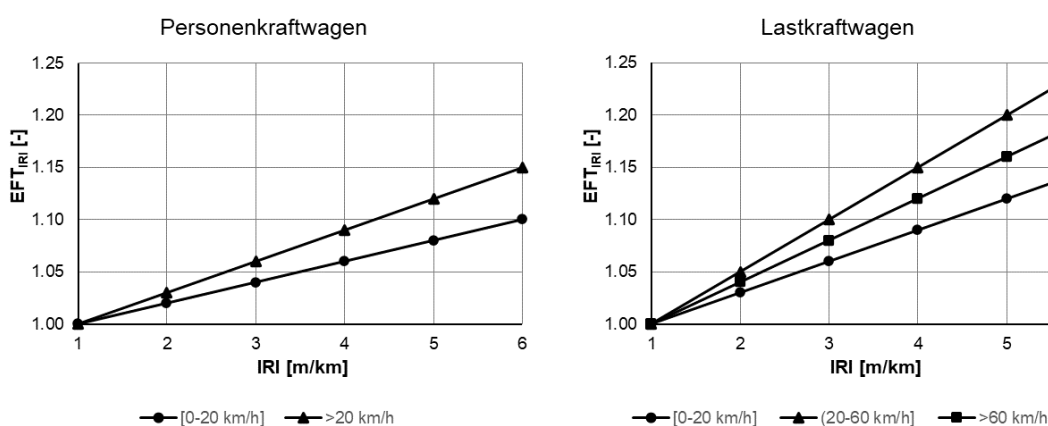


Abbildung 9: Erhöhungsfaktor Treibstoffverbrauch

2.4.4 Baustelleninformationen

Im Block *Baustelleninformationen* werden die Staugeschwindigkeit im Baustellenbereich [km/h] und die Anzahl der Tage für jeweils Auf- und Abbau der Baustelle je Kilometer Baustellenslänge [Tage/km] definiert.

2.4.5 Wirtschaftlichkeitsparameter

Für die Betrachtung der Lebenszykluskosten muss ein Valorisierungs- und Diskontierungszinssatz angegeben werden. Weitere Informationen dazu siehe SABINA Schlussbericht, Kapitel 6.2.1.

2.5 Massnahmen

In der Registerkarte *Massnahmen* werden die Baumassnahmen, die während des Betrachtungszeitraums durchgeführt werden, eingegeben. Durch einen Klick auf + *Baumassnahme hinzufügen* wird eine neue Baumassnahme angelegt. Baumassnahmen können nach dem Erstellen auch umbenannt und gelöscht werden. Generell ist der Betrachtungszeitraum auf fünf

Baumassnahmen limitiert.

Massnahmen

 BASISVARIANTE

 VERGLEICHSVARIANTE

Baumassnahme

+ BAUMASSNAHME HINZUFÜGEN

Sie haben aktuell keine Baumassnahme ausgewählt. Bitte wählen Sie eine Baumassnahme aus der obigen Liste oder legen Sie eine neue Baumassnahme an.

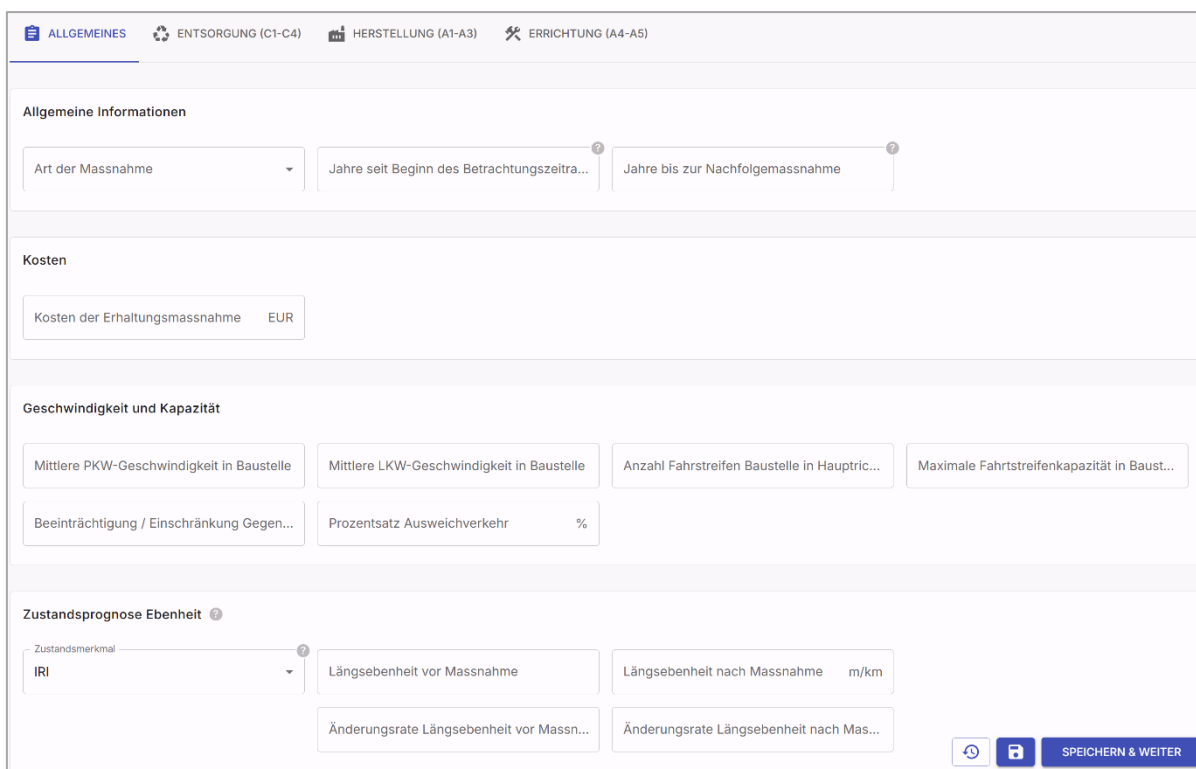
Abbildung 10: Registerkarte *Massnahmen*

2.5.1 Basisvariante und Vergleichsvariante

Da es sich beim SABINA-Bilanzrechner um ein Tool für relative Vergleichsberechnungen handelt, müssen immer eine Basis- und eine Vergleichsvariante definiert werden. Ist nur eine Variante definiert, kann keine Berechnung durchgeführt werden.

2.5.2 Allgemeines

In der Registerkarte *Allgemeines* werden allgemeine Informationen über die geplanten Baumassnahmen definiert.



The screenshot shows a web-based form titled 'Allgemeines' (General). At the top, there are four tabs: 'ALLGEMEINES' (selected), 'ENTSORGUNG (C1-C4)', 'HERSTELLUNG (A1-A3)', and 'ERRICHTUNG (A4-A5)'. The form is organized into four main sections, each with a title and a help icon (question mark):

- Allgemeine Informationen:** Contains three input fields: 'Art der Massnahme' (a dropdown menu), 'Jahre seit Beginn des Betrachtungszeitra...' (a text field), and 'Jahre bis zur Nachfolgemassnahme' (a text field).
- Kosten:** Contains one input field: 'Kosten der Erhaltungsmassnahme' with a unit selector set to 'EUR'.
- Geschwindigkeit und Kapazität:** Contains five input fields: 'Mittlere PKW-Geschwindigkeit in Baustelle', 'Mittlere LKW-Geschwindigkeit in Baustelle', 'Anzahl Fahrstreifen Baustelle in Hauptric...', 'Maximale Fahrstreifenkapazität in Baust...', 'Beeinträchtigung / Einschränkung Gegen...', and 'Prozentsatz Ausweichverkehr' with a unit selector set to '%'. The last two fields are grouped together.
- Zustandsprognose Ebeneheit:** Contains four input fields: 'Zustandsmerkmal' (a dropdown menu with 'IRI' selected), 'Längsebenheit vor Massnahme', 'Längsebenheit nach Massnahme' with a unit selector set to 'm/km', 'Änderungsrate Längsebenheit vor Massn...', and 'Änderungsrate Längsebenheit nach Mas...'. The last two fields are grouped together.

At the bottom right of the form, there are three buttons: a circular arrow icon, a save icon, and a blue button labeled 'SPEICHERN & WEITER'.

Abbildung 11: Registerkarte *Allgemeines*

2.5.2.1 Allgemeine Informationen

Im Block *Allgemeine Informationen* werden projektspezifische Daten definiert, wie

- Art der Massnahme (Neubau-Erneuerung, Verstärkung oder Deckschichtmassnahme),
- Jahr der geplanten Massnahme im Betrachtungszeitraum (z.B. Jahr 0) und
- Jahre bis zur Nachfolgemassnahme (erwartete Nutzungsdauer bis zur Nachfolgemassnahme z.B. 15 Jahre).

2.5.2.2 Kosten

Als Kosten werden die Gesamtkosten der Erhaltungsmassnahme in Euro [€] oder Schweizer Franken [CHF] verstanden. Es obliegt der Anwenderin, welche Teilkosten in die Gesamtkosten einbezogen werden (siehe SABINA Schlussbericht).

2.5.2.3 Geschwindigkeit und Kapazität

Im Block *Geschwindigkeit und Kapazität* werden die Verkehrsdaten auf der betrachteten Strecke mit Einschränkungen durch Baumassnahmen eingegeben. Dazu zählen:

- Mittlere Geschwindigkeit der PKWs im Baustellenbereich [km/h]

ALLGEMEINES **ENTSORGUNG (C1-C4)** HERSTELLUNG (A1-A3) ERRICHTUNG (A4-A5)

Entsorgung

Strassenbauweise	Rückbauart	Breite	Mächtigkeit	Antriebsart LKW	Recycling		Verbrennung		Deponie	
					Distanz	Anteil	Distanz	Anteil	Distanz	Anteil
Beton	Aufbrechen	m	m	Diesel	km	%	km	%	km	%
Asphalt	Aufbrechen Fräsen	m	m	Diesel	km	%	km	%	km	%
Ungebundene Gesteinskörnung	Aushub mit Hydraulikbagger	m	m	Diesel	km	%	km	%	km	%

Entsorgungsanteil Beton (Summe): 0% Entsorgungsanteil Asphalt (Summe): 0% Entsorgungsanteil Ungebundene Gesteinskörnung (Summe): 0%

Abbildung 12: Registerkarte *Entsorgung C1-C4*

Die Antriebsart bezieht sich auf die LKWs, die zum Abtransport des Rückbaumaterials zur weiteren Behandlung (Recycling, thermische Verwertung, Deponie) verwendet werden. Es stehen folgende Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung:

- Diesel
- Batterieelektrisch
- Brennstoffzelle elektrisch
- Komprimiertes Gas
- Hybrid-Diesel
- Plugin-Hybrid-Diesel

2.5.4 Herstellung (Module A1 bis A3)

Der Block *Herstellung A1-A3* berücksichtigt die Herstellungsphase gemäss Europäischer Norm EN 15643:2021. Durch Klicken auf *Schicht hinzufügen* wird ein Fenster (siehe nachfolgende Abbildung) geöffnet, um die standardisierten Schichten des neuen Oberbaus auszuwählen. Dabei wird unterschieden in Asphalt- und Betonbauweise. Die Anwenderin kann auch Schichten aus Asphalt- und Betonbauweise kombinieren.

Bitte wählen Sie eine Schicht

Asphaltbauweise

DECKSCHICHT

BINDERSCHICHT

TRAGSCHICHT

FUNDATIONSSCHICHT

UNGEBUNDENE TRAGSCHICHT

Betonbauweise

OBERBETON

UNTERBETON

HYDRAULISCH GEBUNDENE TRAGSCHICHT (HGT)

UNGEBUNDENE TRAGSCHICHT

ABBRECHEN

Abbildung 13: Block *Schicht hinzufügen*

Für die gewählten Schichten werden anschliessend weitere Eigenschaften definiert. Im Feld *Bezeichnung* sind länderspezifische, normgerechte Asphalt- oder Betonsorten hinterlegt.

Weiters sind der Strom- und Wärmemix anzugeben, die zur Produktion des Mischgutes im Mischgutwerk verwendet werden. Zur Auswahl stehen ein länderspezifischer Strommix oder Ökostrom. Beim Wärmemix kann Erdgas, Flüssiggas, Heizöl, Braunkohlestaub oder Holzstaub ausgewählt werden.

SABINA

Januar 2026

Seite 20/303

The screenshot displays a software interface for configuring road surface layers. It is divided into three main sections: **Deckschicht** (top, green), **Binderschicht** (middle, blue), and **Tragschicht** (bottom, orange). Each section contains a form with the following fields:

- Bezeichnung**: A dropdown menu for selecting the layer type.
- RC-Gehalt**: A text input field for the percentage of RC content.
- Strommix**: A dropdown menu for selecting the mix type.
- Wärmemix**: A dropdown menu for selecting the mix type.
- Haftschrift aus Bitumenemulsion**: A checkbox.
- Splitt abgestreut**: A checkbox.
- Kalkmilch**: A checkbox.

In the **Binderschicht** section, the **Bezeichnung** dropdown menu is open, showing a list of options: AC 11 BN, B 50/70; AC 16 BS, B 50/70; AC 16 BS, PmB; AC 22 BS, B 30/45; AC 22 BS, PmB; and Test 2. At the bottom right of the interface, there are buttons for **SPERCHERN & WEITER** and a **SPERCHERN** button.

Abbildung 14: Schichten des Oberbaus

Bei den Asphaltsschichten stehen zusätzlich folgende Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung:

- Haftschrift aus Bitumenemulsion (wird unterhalb der ausgewählten Schicht aufgebracht),
- Splitt abgestreut (wird oberhalb der ausgewählten Schicht aufgebracht) und
- Kalkmilch (als Suspension unterhalb der ausgewählten Schicht auf die Bitumenemulsion als Schutz aufgespritzt).

2.5.5 Errichtung (Module A4 bis A5)

In der Registerkarte *Errichtung A4-A5* wird die Errichtungsphase gemäss Europäischer Norm EN 15643:2021 betrachtet. Den zuvor in der Registerkarte *Herstellung A1-A3* gewählten Schichten werden nun eine Breite und eine Mächtigkeit zugewiesen. Weiters wird die Transportdistanz vom Produktionswerk der Materialien (z. B. Asphalt- oder Betonwerk) zur Baustelle und die Antriebsart der LKWs angegeben.

ALLGEMEINES

ENTSORGUNG (C1-C4)

HERSTELLUNG (A1-A3)

ERRICHTUNG (A4-A5)

Strassenaufbau

Schicht	Breite ?	Mächtigkeit ?	Transportdistanz ?	Antriebsart LKW ?
Deckschicht	m	m	km	
Binderschicht	m	m	km	
Tragschicht	m	m	km	
Fundationsschicht	m	m	km	

Baumaschinen

Antriebsart Bagger

Antriebsart Walze

Antriebsart Raupen- und Radlader

Antriebsart Fugenfräse

Antriebsart Gleitschalungsfertiger

Antriebsart SD-Fertiger/Gussasphaltbohle

Antriebsart Schraubenkompressor

Produktivität

ALS VORLAGE SPEICHERN
AUS VORLAGE KOPIEREN

SPEICHERN & WEITER

Abbildung 15: Registerkarte *Errichtung A4-A5*

Im Block *Baumaschinen* ist die Antriebsart der eingesetzten Baumaschinen zu definieren. Dabei kann zwischen *Diesel* und *Batterieelektrisch* gewählt werden. Folgende Baumaschinen stehen zur Auswahl:

- Bagger
- Walze
- Raupen- und Radlader
- Fugenfräse
- Gleitschalungsfertiger
- SD-Fertiger/Gussasphaltbohle
- Schraubenkompressor

Diese Parameter werden pro Massnahme definiert, da sich die Antriebsart der Flotte über den Betrachtungszeitraum durchaus ändern wird, um die zukünftigen Nachhaltigkeitsanforderungen zu erfüllen.

Hinweis: Falls keine Angabe gemacht wird, wählt das System automatisch *Diesel* als Antriebssystem.

2.5.5.1 Produktivität

Für jede Baumassnahme muss eine mittlere Produktivität in der Einheit [m²/Tag] definiert werden. Diese kann auch in den Einstellungen als Vorlage definiert und anschliessend eingefügt werden (siehe dazu auch Kapitel 2.7.2 Produktivität).

2.6 Ergebnisse

Nachdem alle Felder ausgefüllt wurden, kann die Berechnung erfolgen. Zuerst ist die Bilanzierungsmethode auszuwählen.

Die Ansicht der Ergebnisse wird anschliessend in *Ökonomie & Ökologie* und *Langfristige Ökologie* unterschieden.

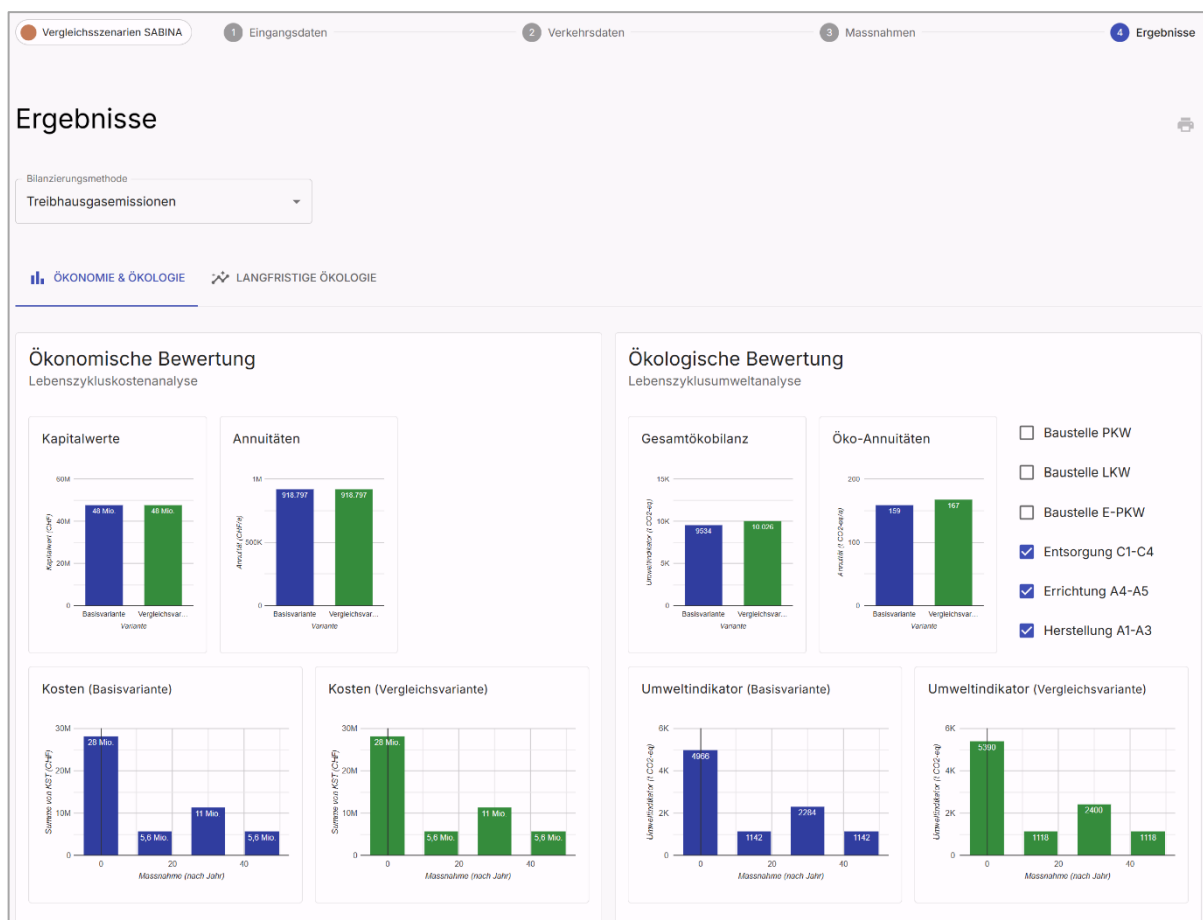


Abbildung 16: Übersicht ökonomische und ökologischen Bewertung

2.6.1 Bilanzierungsmethoden

Die Ergebnisse können in folgenden Wirkungsabschätzungsmethoden angezeigt werden:

- Treibhausgasemissionen (IPCC 2021, GWP 100a)
- Kumulierter Energieaufwand
- Environmental Footprint 3.1
- Methode der ökologischen Knappheit (Umweltbelastungspunkte 2021)

Detailliertere Informationen können dem SABINA Schlussbericht, Kapitel 5.3.2 entnommen werden. Die Methode der ökologischen Knappheit steht nur zur Auswahl, wenn in der Registerkarte *Eingangsdaten* die Schweiz ausgewählt wurde, da diese Bilanzierungsmethode in Deutschland und Österreich nicht zur Anwendung kommt.

2.6.2 Ökonomische Bewertung

In der Ansicht *Ökonomische Bewertung* werden die Daten der Lebenszykluskostenanalyse grafisch dargestellt. Die Darstellung erfolgt aufgegliedert in Basisvariante und Vergleichsvariante, wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Die farbliche Unterscheidung (blau = Basisvariante, grün = Vergleichsvariante) ermöglicht eine schnelle visuelle Gegenüberstellung der Ergebnisse. Weiters wird durch Bewegen des Mauszeigers über eine Säule im Säulendiagramm der exakte Ergebniswert eingeblendet. Die Darstellung gliedert sich in vier Diagramme:

Kapitalwerte:

Dieses Säulendiagramm vergleicht die Kapitalwerte der Basisvariante (blau) und der Vergleichsvariante (grün). Die Werte zeigen die Gesamtkosten über den gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Variante.

Annuitäten:

Hier werden die jährlichen Durchschnittskosten (Annuitäten) der beiden Varianten gegenübergestellt.

Kosten (Basisvariante) und Kosten (Vergleichsvariante):

Diese Diagramme zeigen die zeitliche Verteilung der Kosten für jede Variante über den Betrachtungszeitraum. Die Balken geben an, in welchem Jahr Massnahmen durchgeführt werden und welche Kosten dabei entstehen.

Die Ergebnisse in der nachfolgenden Abbildung beziehen sich auf das Berechnungsbeispiel von Österreich, das im SABINA Schlussbericht, Kapitel 8.4 näher erläutert ist.

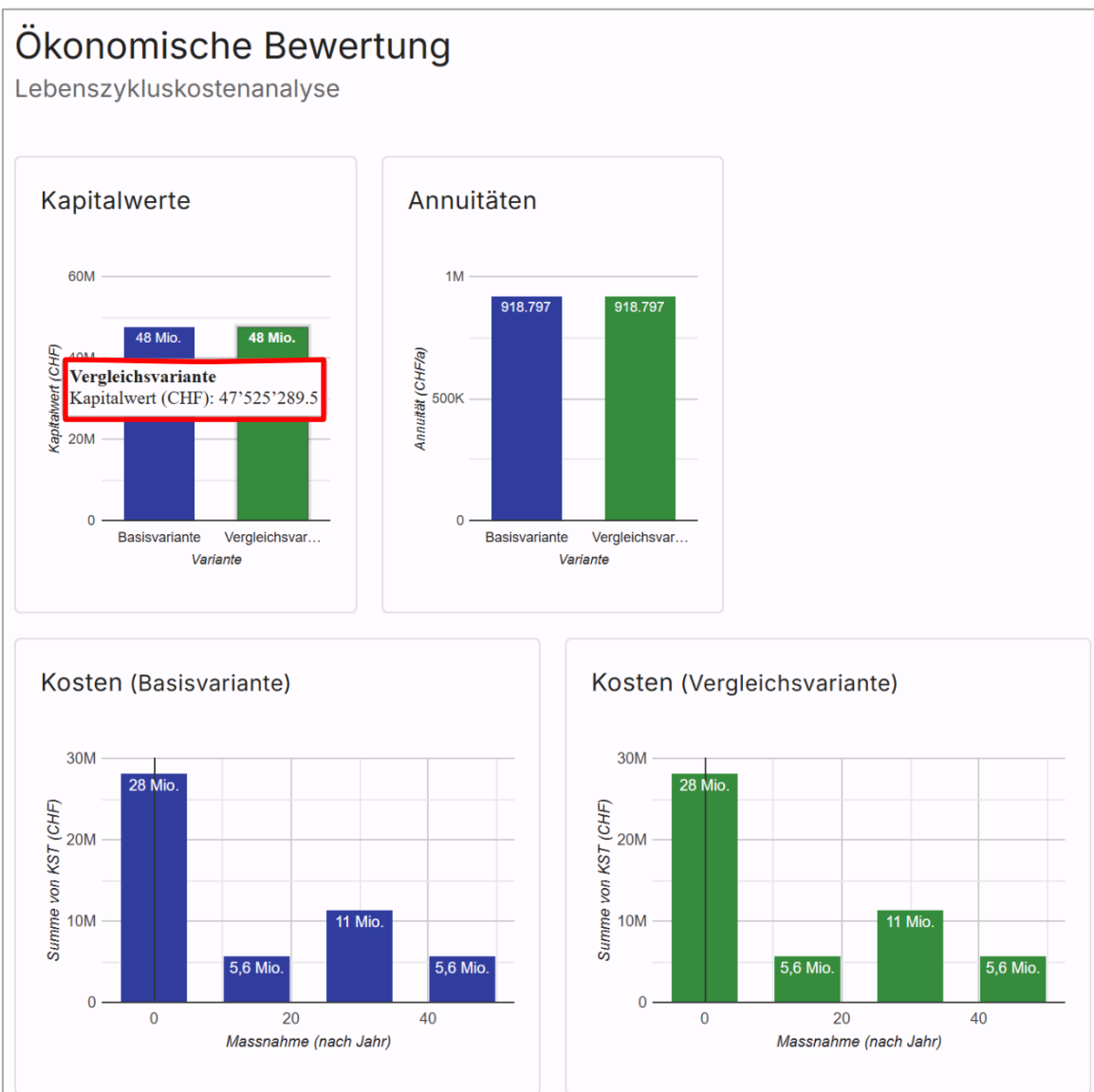


Abbildung 17: Ergebnisdarstellung der ökonomischen Bewertung

2.6.3 Ökologische Bewertung

In der rechten Spalte der Ergebnisdarstellung werden die Ergebnisse der Lebenszyklusumweltanalyse für die Varianten dargestellt.

Auswahlboxen:

Mit den Auswahlboxen kann die Anzeige der Ergebnisse gesteuert werden. Durch Aktivieren oder Deaktivieren der Kästchen können die Ergebnisse in bestimmte Phasen gefiltert werden. Beispielsweise sind in der nachfolgenden Abbildung die Phasen *Entsorgung C1–*

C4, Errichtung A4–A5 und Herstellung A1–A3 aktiviert. Daher werden nur die Emissionen aus diesen Phasen in den Diagrammen berücksichtigt. Wenn die Kästchen *Baustelle PKW*, *Baustelle LKW* und *Baustelle E-PKW* ausgewählt sind, zeigt das System die entsprechenden Emissionen aufgrund von Stauzeiten und Baustellenaktivitäten an.

Gesamtökobilanz:

Dieses Säulendiagramm vergleicht die Gesamtumweltbelastung der Basisvariante (blau) und der Vergleichsvariante (grün). Die Werte werden in der Einheit der jeweilig ausgewählten Wirkungsabschätzungsmethode über den gesamten Lebenszyklus der jeweiligen Varianten dargestellt.

Öko-Annuitäten:

Die rechte Grafik zeigt die Annuitätenwerte der Umweltbelastung für beide Varianten.

Umweltindikator nach Massnahme:

Diese Diagramme zeigen die zeitliche Verteilung der Umweltbelastung für jede Variante über den Betrachtungszeitraum. Die Balken geben an, in welchem Jahr Massnahmen durchgeführt werden und welche Auswirkungen dabei entstehen.

Die Ergebnisse in der nachfolgenden Abbildung beziehen sich auf das Berechnungsbeispiel von Österreich, siehe SABINA Schlussbericht, Kapitel 8.4.

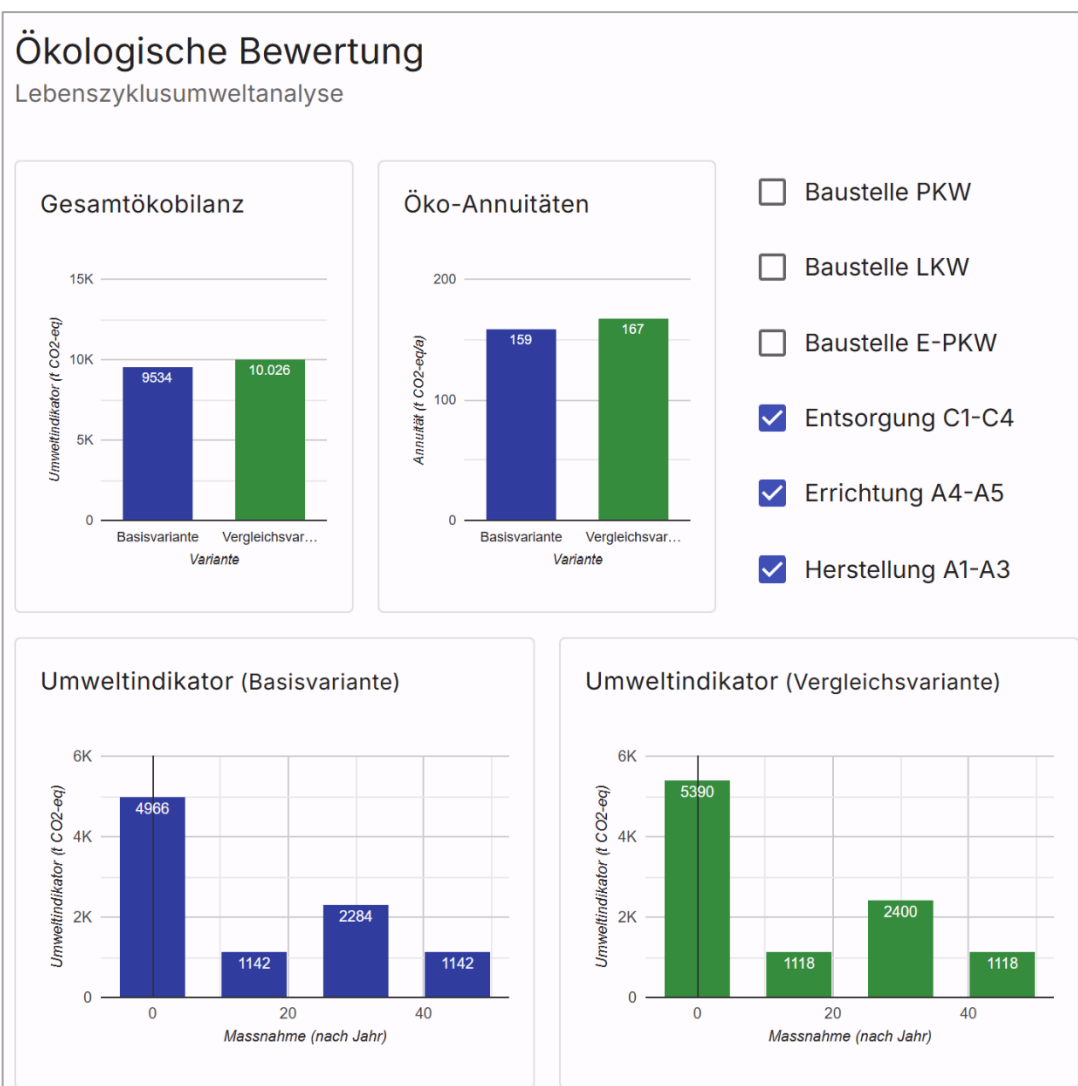


Abbildung 18: Ergebnisdarstellung der ökologischen Bewertung

2.6.4 Langfristige Ökologie

Die Ansicht der *langfristigen Ökologie* gliedert sich in vier Grafiken. Die Ergebnisse zeigen links die gesamten Umweltwirkungen der Varianten und die Öko-Annuitäten sowie rechts die Umweltauswirkungen der Varianten pro Jahr über den Betrachtungszeitraum verteilt. Über die Auswahlboxen *PKW*, *LKW* und *E-PKW* kann die Ergebnisansicht gesteuert werden, um gezielte Analysen in Abhängigkeit von der Fahrzeugkategorie durchführen zu können.



Abbildung 19: Ergebnisdarstellung der langfristigen Ökologie

2.6.5 Exportieren der Ergebnisse

Die Ergebnisse können durch Klick auf das Drucker-Symbol als PDF abgespeichert werden. Ein Export der Zahlenwerte oder Excel-Tabellen ist in der aktuellen Programmversion nicht möglich.

2.7 Einstellungen

Über einen Klick auf das *Zahnrad-Symbol* in der linken oberen Ecke werden die Einstellungen geöffnet. Mit einem Drop-Down-Menü kann zwischen *Eigenen Rezepturen*, *Verkehrsdaten* und *Produktivität* ausgewählt werden.

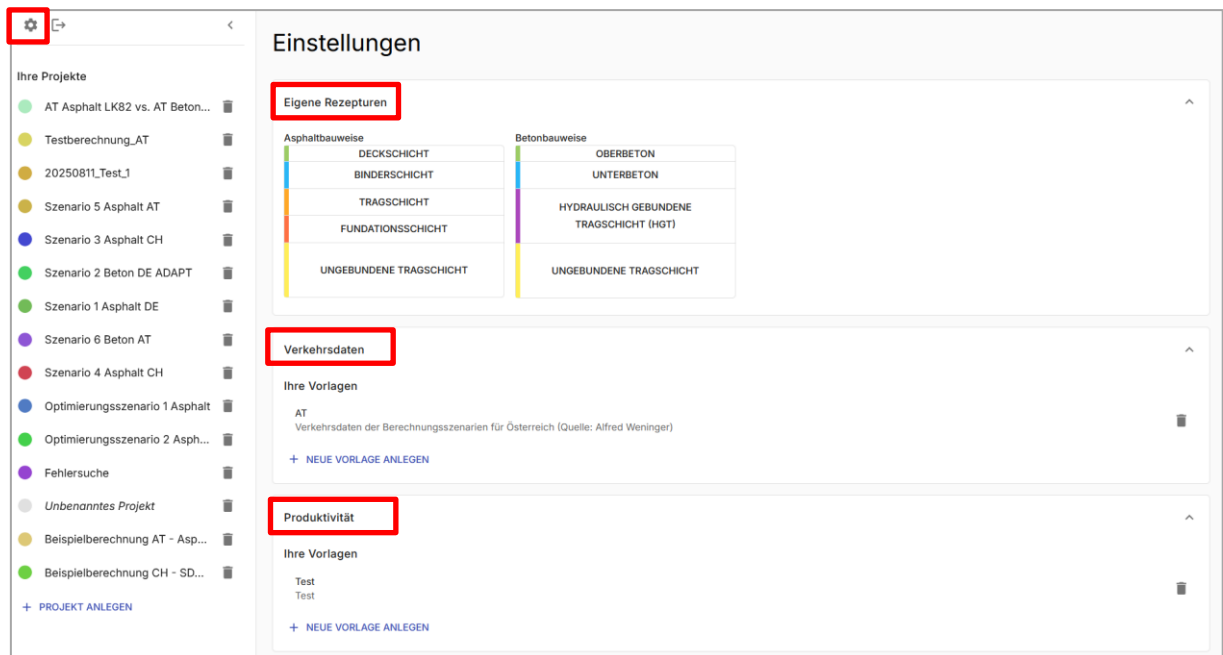


Abbildung 20: Ansicht der Einstellungen

2.7.1 Verkehrsdaten

In der Vorlage *Verkehrsdaten* können alle Blöcke, die in der Registerkarte *Verkehrsdaten* eingegeben sind (siehe Kapitel 2.4 Verkehrsdaten), als Vorlage hinterlegt werden. Bei der Durchführung von vielen Vergleichsrechnungen wird die Eingabe dadurch erheblich beschleunigt.

2.7.2 Produktivität

Die Produktivität der Baustelle kann zur Vereinfachung und Beschleunigung der Eingabe auch als Vorlage definiert werden. Dieser Wert muss für jede Massnahme definiert werden (siehe nachfolgende Abbildung).

Produktivität

Standardeingaben

Vorlagenname

Beschreibung

Produktivität

Produktivität bei Neubau/Erneuerung

Produktivität bei Instandsetzung De...

Produktivität bei Verstärkung

ABBRECHEN

SPEICHERN

Abbildung 21: Vorlage der Produktivität

2.7.3 Geplante Erweiterung *Eigene Rezepturen*

Die Funktion *Eigene Rezepturen* ist in der aktuellen Programmversion des SABINA-Bilanzrechners nur eingeschränkt verfügbar. Die Eingabe und Definition von eigenen Rezepturen ist möglich, jedoch können diese derzeit nicht für die Berechnung herangezogen werden.

Im Block *Eigene Rezepturen* kann mittels Klicks auf die jeweilige Schicht und dem Button *+ Neue Rezeptur anlegen* eine eigene Materialzusammensetzung definiert werden. Je nachdem ob es sich um eine Asphalt- oder Betonschicht handelt, stehen verschiedene Felder für die Eingabe zur Verfügung (vgl. die beiden vorangegangenen Abbildungen).

Die Anteile der Asphalt-Rezeptur müssen so aufgeteilt werden, dass eine Summe von 1000 kg erreicht wird. Bei der Eingabe von Beton-Rezepturen müssen die Materialanteile in [kg] eingegeben werden. Die Summe aller Einzelmassen muss die Dichte bzw. das Gewicht eines Kubikmeters Beton [kg/m³] erreichen.

Eigene Rezeptur

Kategorie	Eigenschaft	Wert
Gesteinskörnung	Gesteinskörnung, fein (< 2 mm)	kg
	Gesteinskörnung, grob (> 2 mm)	kg
	Asphaltgranulat (RAP)	kg
	Füller	kg
Bindemittel, bituminös	Strassenbaubitumen	kg
	Polymermodifizierte Bitumen	kg
	Gummimodifizierte Bitumen	kg
	Wachsmodifizierte Bitumen	kg
	Trinidad ePure modifizierte Bitumen	kg
Zusatzstoffe	 Bitumenemulsion	kg
	Cellulosefasern	kg
	Rejuvenatoren	kg

Abbildung 22: Eingabefelder der Eigenen Asphalt-Rezepturen

Eigene Rezeptur

Rezepturname

Land

Verwendeter Strommix

Verwendete Wärmequelle

Kategorie	Eigenschaft	Wert
Gesteinskörnung, fein (< 2 mm)	Primär	kg
	RC	kg
Gesteinskörnung, grob (> 2 mm)	Primär	kg
	RC	kg
Bindemittel, hydraulisch	CEM I	kg
	CEM II/A	kg
	CEM II/B CH-Mix	kg
	CEM II/B-LL	kg
	CEM III/A	kg
	CEM III/B	kg
	CEM ZN/D	kg
Wasser	Wasser	kg
Zusatzstoffe	Luftporenbildner	kg
	Fließmittel	kg

ABBRECHEN

SPEICHERN

Abbildung 23: Eingabefelder der Eigenen Beton-Rezepturen

3 HINWEISE ZU BERECHNUNGS- UND EINGABEBEFEHLERN

3.1 Berechnungsfehler

Da der SABINA-Bilanzrechner derzeit als Prototyp zur Verfügung gestellt wird, könnten sich *Berechnungsfehler* ergeben und als solche angezeigt werden, die auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sind. In diesem Fall sollte eine Prüfung auf fehlende bzw. unvollständige Eingaben erfolgen.

Im Folgenden sind Fehler erläutert, die zu der in der nachfolgenden Abbildung gezeigten Fehlermeldung führen können.

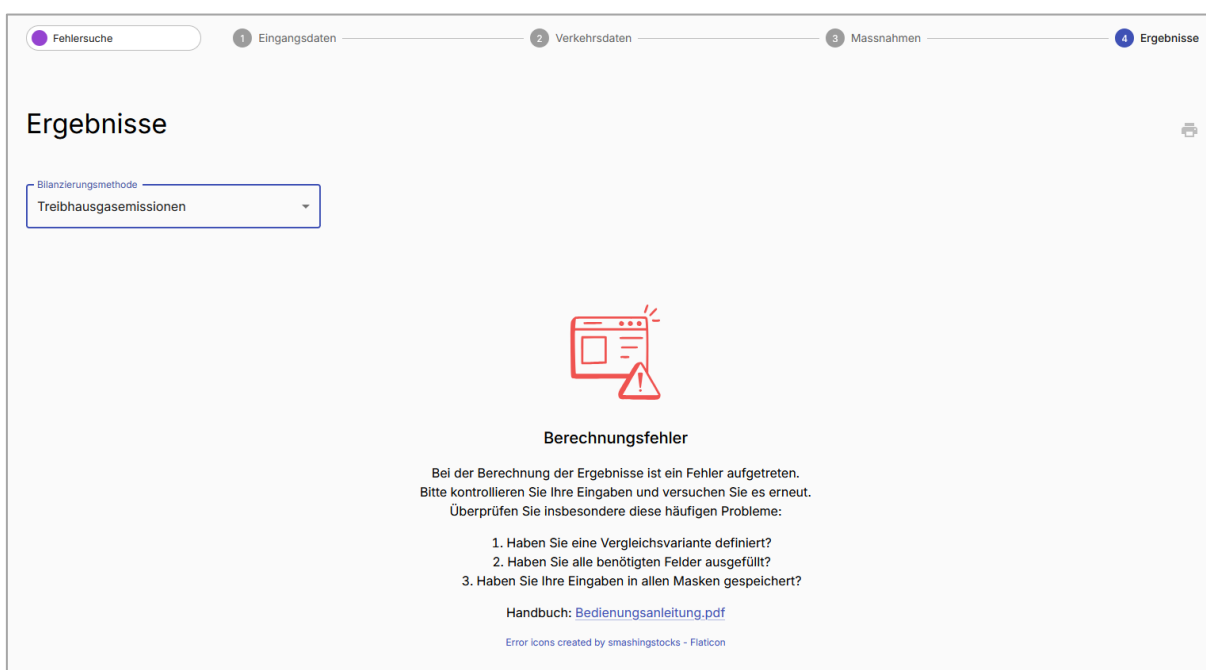


Abbildung 24: Fehlermeldung beim Berechnen der Ergebnisse

3.2 Fehlerhafte und unvollständige Eingaben

Folgende Fehler können die Ursache für die Fehlermeldung in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sein:

Definieren einer Vergleichsvariante

Da es sich beim SABINA-Bilanzrechner um eine Software für relative Vergleichsberechnungen handelt, kann eine Berechnung nur dann erfolgen, wenn eine Basis- und eine Vergleichsvariante definiert wurden.

Unvollständige Eingaben:

Sobald eine Massnahme hinzugefügt wird, müssen alle zugehörigen Felder vollständig ausgefüllt werden. Werden Pflichtfelder ausgelassen, erscheint eine Fehlermeldung, und die Berechnung kann nicht durchgeführt werden.

Speichern der Eingaben:

Falls die Eingaben nicht gespeichert wurden und die Felder somit leer sind, kann ebenfalls keine Berechnung erfolgen.

Dezimaltrennzeichen:

Wird ein Punkt als Dezimaltrennzeichen verwendet, obwohl die Software auf österreichisches Format eingestellt ist, kann dies zu einer Fehlermeldung führen. In diesem Fall muss ein Komma verwendet werden.

Eigene Rezepturen:

Es kann derzeit keine Berechnung erfolgen, wenn eine *Eigene Rezeptur* verwendet wird (siehe Kapitel 2.7.3).

3.3 Bautechnische Hinweise bei der Eingabe

Folgende Fehler bezüglich der bautechnischen Hinweise können die Ursache für die Fehlermeldung in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sein:

Recyclinganteil bei Gussasphalt:

Für Gussasphalt ist kein Recyclinganteil zugelassen (0 %). Trägt man dennoch einen Prozentsatz ein, führt dies zu einer Fehlermeldung und verhindert die Berechnung.

Abstufung des Recyclinganteils

Bei der Eingabe des Recyclinganteils muss darauf geachtet werden, dass es nur möglich ist, Abstufungen von 5 % im System einzutragen. Der maximale Recyclinganteil beträgt 95%. Die Eingabe von 100% Recyclinganteil führt zu einem Berechnungsfehler.

Recyclinganteil AC F 22

Bei der Asphaltsorte AC F 22 muss darauf geachtet werden, dass entsprechend den technischen Normen ein Recyclinganteil zwischen 60 bis 95 % angegeben werden muss. Die Software erlaubt zwar einen Anteil ausserhalb dieses Bereichs einzugeben, dies führt aber in weiterer Folge zu einer Fehlermeldung bei der Berechnung.



ANHANG C: PFLICHTENHEFT

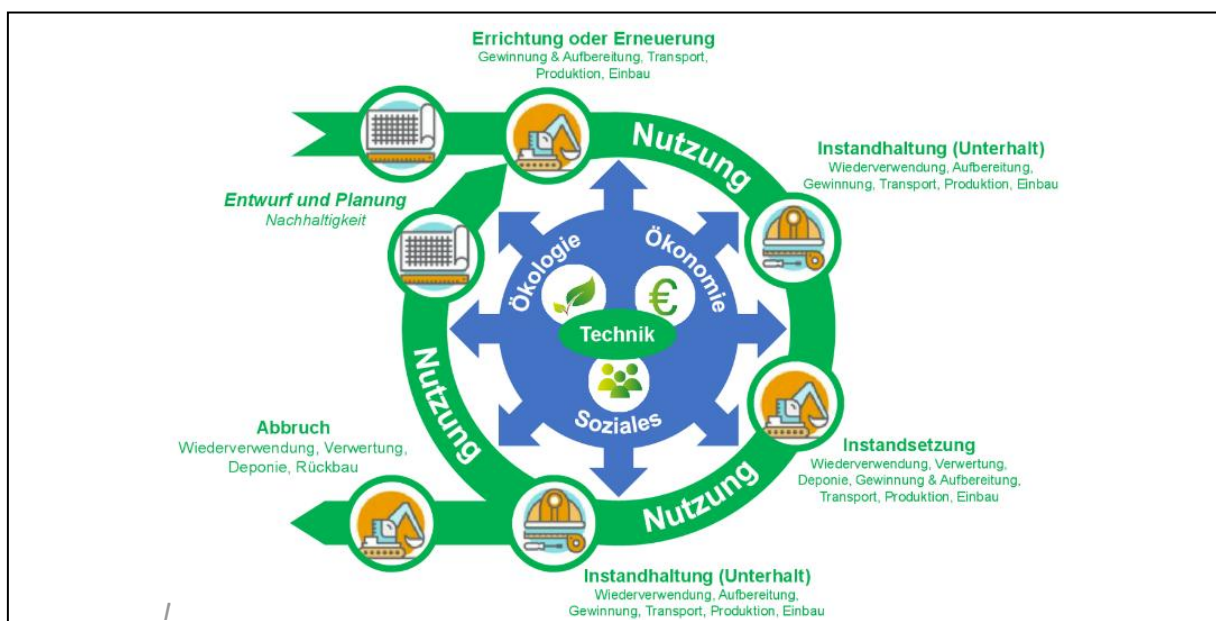
Pflichtenheft für IT-Programmierer

Ein Projekt finanziert im Rahmen der

D-A-CH Kooperation

Verkehrsinfrastrukturforschung 2022

D-A-CH 2022



Januar 2026

Impressum

Programmerstellung und -finanzierung der D-A-CH Kooperation:

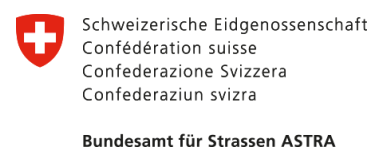
Bundesministerium für Verkehr (BMV)
Invalidenstraße 44
10115 Berlin
Deutschland



Bundesministerium für Innovation, Mobilität und
Infrastruktur (BMIMI)
Radetzkystraße 2
1030 Wien
Österreich



Bundesamt für Strassen (ASTRA)
Papiermühlestrasse 13
3063 Ittigen
Schweiz



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Sensengasse 1
1090 Wien
Österreich



Für den Projektinhalt verantwortlich:

Umtec Technologie AG
Eichtalstrasse 54
8634 Hombrechtikon, Schweiz



Technische Universität-Braunschweig
Institut für Straßenwesen
Beethovenstraße 51 b
38106 Braunschweig, Deutschland



Hochschule Campus Wien – University of Applied Sciences
Department Bauen und Gestalten
Favoritenstraße 226
1100 Wien, Österreich



SABINA

Strassenbauweisen Bilanzierung Nachhaltigkeit

D-A-CH 2022

Auftragnehmer

Umtec Technologie AG, Schweiz

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Deutschland

Hochschule Campus Wien, Department Bauen und Gestalten, Österreich

Autorinnen und Autoren

Thomas POHL, MSc.

Dr. Alfred WENINGER-VYCUDIL

Univ.-Prof. Dr. Michael P. WISTUBA

DIⁱⁿ Nina SAM

Dominik OSTERWALDER, MSc.

Nick SPITZHOFFER, BSc.

Auftragnehmerinnen:

Umtec Technologie AG, Schweiz

Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen, Deutschland

Hochschule Campus Wien, Department Bauen und Gestalten, Österreich

Inhaltsverzeichnis

Anhang C: Pflichtenheft	1
1 Ausgangslage	5
1.1 Einleitung und Zielsetzung	5
1.2 Anwenderinnen und Anwendungsbereich.....	5
2 Pflichtenheft	6
2.1 Dokumentengrundlage	6
2.2 Grundlegende Anforderungen	7
2.3 Struktur und Aufbau des SABINA Bilanzrechners.....	7
2.4 Eingaben und Eingabewerte für die Berechnungen.....	9
2.5 Berechnungen	16
3 User-Stories	17

1 AUSGANGSLAGE

1.1 Einleitung und Zielsetzung

Das Ziel von SABINA ist es, einen ganzheitlichen Bewertungsrahmen für die Nachhaltigkeit von Strassenbefestigungen zu entwickeln. Dieser Rahmen bewertet Strassenkonstruktionen (Oberbau und Unterbau) nach ökologischen, technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Kriterien unter besonderer Berücksichtigung des Treibhauspotentials (GWP), des Energieverbrauchs (KEA inkl. Grauenergie) und der Dauerhaftigkeit. Der Rahmen erfasst den gesamten Lebenszyklus der Strassenkonstruktion, einschliesslich Ausbau und Wiederverwendung, und bezieht die Emissionen von Nutzenden mit ein.

Die Software SABINA Online-Bilanzrechner wird nutzungsfreundlich und intuitiv gestaltet. Grundlagen für das Projekt werden aus aktueller Literatur, nationalen und internationalen Regelwerken sowie Öko-Datenbanken zusammengestellt und systematisch aufbereitet. Diese bilden die Basis für die Definition massgebender Begriffe und die Dokumentation relevanter Kennwerte für die SABINA-Datenbank.

1.2 Anwenderinnen und Anwendungsbereich

Die primäre Zielgruppe von SABINA sind die nationalen Strassenverwaltungen in Deutschland, Österreich und der Schweiz, die das Tool als Entscheidungshilfe für die Analyse verschiedener Oberbauvarianten nutzen. SABINA setzt detaillierte Daten zu Materialien, Lebenszyklen und Erhaltungsmassnahmen voraus und erfordert entsprechende Fachkenntnisse im Bereich Strassenbefestigungen. Das Tool unterstützt die Planung und den Vergleich von Oberbauvarianten und kann bei der Entwicklung von Bauprogrammen als Entscheidungstool eingesetzt werden. Es fördert den technischen Dialog zwischen Fachexperten. Derzeit beschränkt sich SABINA auf die Bewertung der Strassenbefestigung und ist für Entscheidungen, die mehrere Anlagen betreffen, nur begrenzt einsetzbar, bietet jedoch eine Basis für zukünftige Erweiterungen.

2 PFLICHTENHEFT

2.1 Dokumentengrundlage

Für die Programmierung stehen neben diesem Pflichtenheft folgende Dokumente und Files zur Verfügung:

1. **2024_03_12_Ökobilanzmodell SABINA.xlsm** (MS-Excel Sheet für die Öko-Bilanzierung mit den entsprechenden Hintergrunddaten sowie der Eingangsdaten für weiterführende Berechnung im Bereich Wirtschaftlichkeit und soziale Bewertungsindikatoren)
2. **SABINA_V02.ipynb** mit Python Code für folgende Berechnungen:
 - Einfluss IRI auf Treibstoff- und Energieverbrauch
 - Berechnung Staustunden (zusätzliche Staustunden durch die Massnahme)
 - Berechnung Treibstoffverbrauch allgemein in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Zustand
 - Dauer der Massnahme (Baustelle)
 - Berechnung Verkehrsbelastung während der Massnahme für die einzelnen Fahrzeugkategorien
 - Berechnung zusätzlicher Treibstoff- und Energieverbrauch während der Massnahme
 - Modellierung GWP-Effekt bis zur Nachfolgemassnahme
3. **SAINBA_Add_AUN_IRI_V01.ipynb** mit Python Code für folgende Berechnungen:
 - Umrechnung AUN-Werte in IRI-Werte
 - Eingangsdaten für Prognose Längsebenheit unter Modul EINSTELLUNGEN
4. **SABINA_Add_Wirtschaft_V01.ipynb** mit Python Code für folgende Berechnungen:
 - Berechnung Wirtschaftlichkeitsindikatoren

Diese Dokumente und Files werden den IT-Programmierern zur Verfügung gestellt.

2.2 Grundlegende Anforderungen

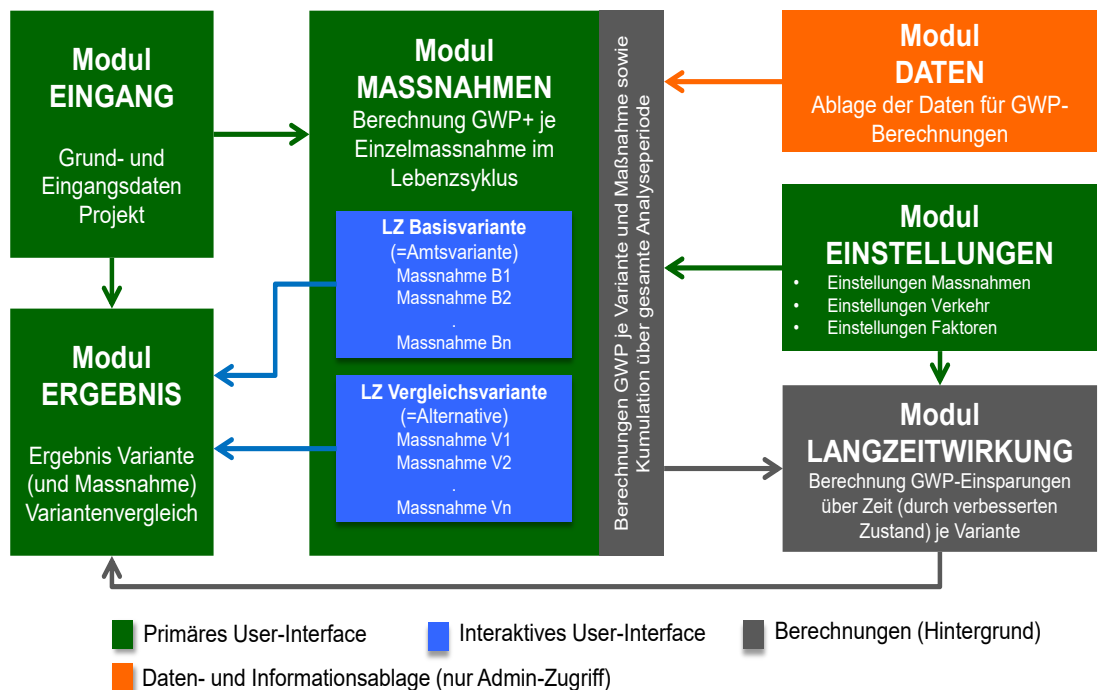
Folgende Anforderungen müssen in der IT-Programmierung des SABINA-Tools erfüllt werden:

- Online verfügbar als Webapplikation für die Browser Chrome, Edge und Firefox
- Keine Benutzungslogins mit spezifischen Benutzungsberechtigungen, es muss jedoch möglich sein, getätigte Eingaben und die daraus resultierenden Ergebnisse herunterzuladen (z.B. als PDF oder besser noch als Excel) und dieses von Neuem hochzuladen, um zu einem späteren Zeitpunkt daran weiterzuarbeiten. Die Eingaben und Ergebnisse werden nur lokal gespeichert, wobei die Anwenderin die Möglichkeit hat, mehrere Projekte unter anwenderspezifischer Namensdefinition abzulegen.
- Länderspezifische Auswertung für DE, AT und CH
- Robust und einfach aufgestellt, im Wesentlichen Front-End mit User-interface, Back-End mit Ökobilanzdaten, Kostendaten und Daten der sozialen Indikatoren
- Basierend auf einer gängigen Programmiersprache; keine experimentellen Programmiersprachen
- Hintergrunddaten (Kosten sowie Ökobilanzdaten) müssen über einen einfachen CSV-Import oder ähnlich nach Fertigstellung des Tools möglich sein. Zum Beispiel wenn sich die GWP-Faktoren von einzelnen Asphaltarten ändern. Dies sollte jedoch nur für einen Administrator möglich sein.
- Sprache ist Deutsch, es soll jedoch von der Software-Architektur so eingerichtet sein, dass weitere Sprachen möglich sind, z.B. durch Umstellung der Sprache des Browsers. Es wird auch empfohlen, eher mit Symbolen als mit Text zu arbeiten.
- Das Tool sollte eine interaktive Hilfe besitzen (z. B. mit Mouseover Effekt)
- Domain: SABINA-Tool.net

2.3 Struktur und Aufbau des SABINA Bilanzrechners

Der SABINA-Bilanzrechner soll eine modulartige Struktur aufweisen, die es dem Anwender erlaubt, die Rechenprozesse zu verstehen und auch die notwendigen Eingangsdaten effizient zu verwalten. Die nachfolgende Grafik in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt die Struktur und die Module des SABINA Bilanzrechners:

Struktur und Module Bilanzrechner



Die Aufgaben der einzelnen Module können wie folgt zusammengefasst werden:

- **Modul EINGANG** zur Eingabe der notwendigen Eingangsdaten für die Berechnungen im Modul MASSNAHMEN und im Modul LANGZEITWIRKUNGEN.
- **Module MASSNAHMEN** zur Definition des Lebenszyklus der beiden zu analysierenden Varianten (Basisvariante und Vergleichsvariante). Die Anwenderin hat dabei die Möglichkeit die Einzelmassnahmen im Lebenszyklus für jede der beiden Varianten zu definieren. Insgesamt soll je Variante eine Anzahl von maximal 5 Massnahmen eingegeben werden können. Im Rahmen dieses Moduls sollen die entsprechenden Berechnungen der Bewertungsindikatoren erfolgen. Dabei greift das Modul einerseits auf die Eingangsdaten im Modul EINGANG sowie auf die Daten zur Öko-Bilanzierung (GWP-Werte) im Modul DATEN und die im Modul EINSTELLUNGEN hinterlegten Einstellungsdaten zurück.
- **Modul DATEN** enthält die GWP-Werte der einzelnen auswählbaren Materialien und Prozesse zur Öko-Bilanzierung. Der Zugriff ist auf den Administrator beschränkt.
- **Modul EINSTELLUNGEN** dient zur Ablage von anwenderspezifischen Einstellungen, die in den meisten Fällen unabhängig vom Projekt für eine gesamte Region oder eine

grössere Anzahl von Analysen herangezogen werden können und nicht projektspezifisch sind. Sie dienen als Eingangsgrösse für das Modul MASSNAHMEN und die damit verbundenen Berechnungen.

- **Modul LANGZEITWIRKUNG** ist ein spezielles Modul, das unter Heranziehung der Eingangsdaten (Modul EINGANG, der im Modul MASSNAHMEN definierten Lebenszyklen sowie der im Modul EINSTELLUNGEN gespeicherten zusätzlichen Eingangswerte) eine spezielle Analyse der Langzeitwirkungen zwischen den Erhaltungsmassnahmen durchgeführt und vom Anwender als Ergänzung ausgewählt werden kann. Die Berechnungen müssen somit durch den Anwender angestossen werden.
- **Modul ERGEBNIS** dient als GUI für die Darstellung sämtlicher Ergebnisse aus den Berechnungen und Analysen. Dabei geht es einerseits um die Darstellung der Einzelergebnisse aller Massnahmen der beiden ausgewählten Varianten, aber auch um die Berechnung von zusammenfassenden Werten für die Massnahme und den Vergleich bzw. die Gegenüberstellung. Das Modul ist in Form eines Dashboards mit BI-Funktionen konzipiert, sodass die Anwenderin von den Gesamtergebnissen in die Detailergebnisse gelangen kann.

Übergeordnet soll der SABINA-Bilanzrechner über eine Startseite (Starting Page) und über eine verknüpfte Arbeitsseite (Working Page) aufgerufen werden. Die massgebenden Funktionen und Informationen sind dabei:

- Einstieg in den SABINA-Bilanzrechner mit SABINA-Grafik (Titelbild des Pflichtenheftes) zum Start des Tools
- Management der Projekte
- Ausführung der Berechnungen
- Möglichkeit des Downloads des SABINA-Ergebnisberichts
- Navigation zu den Modulen
- Aufruf der Hilfe in Form des Downloads des SABINA-Benutzungshandbuchs

2.4 Eingaben und Eingabewerte für die Berechnungen

Im Rahmen der Berechnungen sind umfangreiche Eingaben durch den Anwender notwendig,

die in Abhängigkeit von den Modulen unterschiedlich gestaltet sind. Nachfolgend sind die jeweiligen Eingaben und Eingabewerte beschrieben:

- **Modul EINGANG:** Grund- und Eingangsdaten des Projekts bzw. des zu betrachteten Streckenabschnitts:
 - Projektbezeichnung: PrjBez, Text 255
 - Land: CodeLand, Code (AT, CH, DE)
 - Bilanzierungsmethode [Auswahl]: BilanzMeth, Code ()
 - Länge Abschnitt [km]: Laenge, Double
 - Breite Fahrbahn [m]: Breite, Double
 - Anzahl Fahrstreifen [#]: AnzFStr, Integer
 - Maximale Fahrstreifenkapazität [Kfz/h]: MAX_Kap, Integer
 - Betrachtungszeitraum [Jahre]: BetrZeitr, Integer
 - Aktuelles Jahr [Jahr]: AktJahr, Integer
 - Gesamtverkehr [KFZ/24h]: DTV, LongInteger
 - Schwerverkehr [LKW/24h]: DTV_SV, LongInteger
 - Zuwachsrate Verkehr [%]: Z_VK, Double
 - Anteil E-PKWs [%]: EPKW_Anteil, Double
 - Zuwachsrate E-PKWs [%]: Z_EPKW, Double
 - Höchstzulässige Geschwindigkeit Pkw [km/h]: V_PKW, Integer
 - Höchstzulässige Geschwindigkeit Lkw [km/h]: V_LKW, Integer
 - Aktuelle jährliche Änderungsrate Längsebenheit (IRI [m/km] oder AUN [cm³], Auswahl des Indikators unter Einstellungen): Delta_IRI_OM, Double

- **Modul MASSNAHMEN:** Hier definieren die Anwender die Baumaßnahme(n), die in der angegebenen Nutzungsdauer erfolgen, z.B. Sanierung Deck- und Binderschicht. Die Eingangsdaten sind im Ökobilanz Excel aufgeführt und umfassen folgende Eingaben:

- Bezeichnung der Baumassnahme
- Angaben zum Rückbau: Asphalt und Beton
- Rückbau über Fräsen oder Aufbrechen
- Breite, Mächtigkeit
- Antriebssystem der LKW, die das Rückbaumaterial abtransportieren (Diesel, Komprimiertes Gas, Hybrid-Diesel, Plug-in Hybrid, Batterieelektrisch, Brennstoffzelle)
- Transportdistanzen ins Recycling, zur Verbrennung und zur Deponie
- Entsorgungs-Splitting: Wie viel % des Materials geht ins Recycling, wie viel in einen Verbrennungsprozess und wie viel wird in einer Deponie beseitigt
- Danach folgen Angaben zur Strassenbauweise je Schicht:
 - Asphaltbauweise (von unten nach oben): Frostschutzschicht, Fundationsschicht, Tragschicht, Binderschicht, Deckschicht
 - Betonbauweise (von unten nach oben): Frostschutzschicht, Hydraulisch gebundene Tragschicht, Unterbeton, Oberbeton
 - Je Schicht muss entweder eine vordefinierte / von uns angegebene Asphalt-/Betonart ausgewählt werden oder eine eigene Rezeptur benannt und eingegeben werden können. Diese eigene Rezeptur umfasst die Gesteinskörnung, das Bindemittel und Zusatzstoffe
 - Beim Beton wird die Zementart ausgewählt und der Recycling-Anteil, der RC-Gehalt angegeben (Anteil an rezykliertem Gesteinskörnung in Bezug auf die gesamte Gesteinskörnung), der Strommix (Landesstrommix vs. Ökostrom) im Betonwerk sowie Breite und Mächtigkeit der Schicht. Zusätzlich kann angegeben werden, ob Stahleinlagen (Anker und Dübel), eine Haftschrift aus Bitumenemulsion, mit Splitt abgestreut oder Kalkhydrat verwendet wird. Bei den Stahleinlagen und den Angaben zur Haftschrift haben wir einen Default-Wert hinterlegt, der angepasst werden kann (Abstand der Stahleinlagen, Schichtmächtigkeit der Bitumenemulsion etc.).

- Beim Asphalt ist es identisch bis auf den Punkt des Wärmemixes, welcher ausgewählt werden muss (Erdgas, Flüssiggas, Heizöl, Holzstaub, Braunkohlestaub).
 - Transportdistanz der Baumaterialien zur Baustelle inkl. Angabe zum Transportmittel (Antriebssystem des LKW).
 - Bei den Baumaschinen gibt es eine fixe nicht anpassbare Auswahl der im Strasseninfrastrukturbau gängigsten Baumaschinen: Bagger, Walze, Raupen- und Radlader, Gleitschalungsfertiger, SD-Fertiger, Schraubenkompressor. Hierbei wird auch das Antriebssystem ausgewählt (Diesel vs. Batterieelektrisch)
- Für die Berechnung der Indikatoren für die Wirtschaftlichkeit, die Wirkungen der Massnahme auf Strassennutzende sind je Massnahme folgende Eingaben zu tätigen:
- Art der Massnahme (Neubau-Erneuerung / Verstärkung / Deckschicht-massnahme): M_Eingabe, Code (N, V, D)
 - Jahr der Massnahme ab aktuellem Jahr bei erster Massnahme [Jahre]: M_Jahr, Integer
 - Jahre bis zur Nachfolgemassnahme [Jahre]: NFM_Jahr (W_NFM#_Jahr), Integer

Die Jahre bis zur Nachfolgemassnahme sind für jede einzelne Massnahme anzugeben. Auch bei Massnahme 5 ist ggf. dieser Wert anzugeben, da er für den Modul Langzeitwirkungen erforderlich ist.
 - Kosten der Erhaltungsmassnahme [€ oder CHF]: W_KST_M#, Double
 - Höchstzulässige Geschwindigkeit in Baustelle Pkw [km/h]: V_PKW_M
 - Höchstzulässige Geschwindigkeit in Baustelle Lkw [km/h]: V_LKW_M
 - Anzahl Fahrstreifen Baustelle in Hauptrichtung [#]: AnzFStr_Baustelle, Integer
 - Maximale Fahrstreifenkapazität in Baustelle [Kfz/h]: MAX_Kap_Baustelle, Integer

- Beeinträchtigung / Einschränkung Gegenrichtung [%]: Einschr_Gegen-RFB, Double
- Prozentsatz Ausweichverkehr [%]: Anteil_DTV_Ausweich, Double
- IRI (AUN, sW-Wert) vor Massnahme [m/km] ([cm³], [‰]), nur bei 1. Massnahme: VM_IRI, Double
- IRI (AUN) nach Massnahme [m/km] ([cm³]): NM_IRI, Double
- **Modul DATEN:** Datenbank für Hintergrunddaten für Ökobilanz und für die Berechnung der sozialen Aspekte (ausgedrückt als kg CO₂-eq). Die notwendigen Daten für die Berechnungen sind im Excel aufgeführt. Die Grundstruktur ist bei den Umweltdaten untereinander vergleichbar. Die Daten sind in einer CSV-Datei abgelegt.
- **Modul EINSTELLUNGEN:** Das Modul beinhaltet generelle Eingangswerte, die zwar von Projekt zu Projekt abweichen können, aber in der Regel nur
 - Standardeinstellungen gem. MS Excel
 - Manuelle Rezepturen
 - Einstellungen Massnahmen
 - Produktivität der Massnahme bei Neubau / Erneuerung in m²/Tag: P_Neubau, LongInteger
 - Produktivität der Massnahme bei Instandsetzung Deckschicht in m²/Tag: P_Decksch, LongInteger
 - Produktivität der Massnahme bei Verstärkung in m²/Tag: P_Verst, LongInteger
 - Einstellungen Verkehr
 - Tagesganglinie
 - Prozentsatz Tagesverkehr Stunden 1 bis 24 [%]: TGL_#, Double
 - Verbrauchskurve Treibstoff PKW
 - Kraftstoffverbrauch PKW 0-20 km/h in Liter/100km: T_PKW_0_20, Double
 - Kraftstoffverbrauch PKW 20-40 km/h in Liter/100km: T_PKW_20_40, Double

- Kraftstoffverbrauch PKW 40-60 km/h in Liter/100km:
T_PKW_40_60, Double
- Kraftstoffverbrauch PKW 60-80 km/h in Liter/100km:
T_PKW_60_80, Double
- Kraftstoffverbrauch PKW 80-100 km/h in Liter/100km:
T_PKW_80_100, Double
- Kraftstoffverbrauch PKW 100-120 km/h in Liter/100km:
T_PKW_100_120, Double
- Kraftstoffverbrauch PKW >120 km/h in Liter/100km:
T_PKW_120, Double
- Verbrauchskurve Treibstoff LKW
 - Kraftstoffverbrauch LKW 0-20 km/h in Liter/100km:
T_LKW_0_20, Double
 - Kraftstoffverbrauch LKW 20-40 km/h in Liter/100km:
T_LKW_20_40, Double
 - Kraftstoffverbrauch LKW 40-60 km/h in Liter/100km:
T_LKW_40_60, Double
 - Kraftstoffverbrauch LKW 60-80 km/h in Liter/100km:
T_LKW_60_80, Double
 - Kraftstoffverbrauch LKW >80 km/h in Liter/100km: T_LKW_80, Double
- Verbrauchskurve Energie E-PKW
 - Energieverbrauch E-PKW 0-20 km/h in kWh/100km:
T_EPKW_0_20, Double
 - Energieverbrauch E-PKW 20-40 km/h in kWh/100km:
T_EPKW_20_40, Double
 - Energieverbrauch E-PKW 40-60 km/h in kWh/100km:
T_EPKW_40_60, Double
 - Energieverbrauch E-PKW 60-80 km/h in kWh/100km:
T_EPKW_60_80, Double

- Energieverbrauch E-PKW 80-100 km/h in kWh/100km:
T_EPKW_80_100, Double
- Energieverbrauch E-PKW 100-120 km/h in kWh/100km:
T_EPKW_100_120, Double
- Energieverbrauch E-PKW >120 km/h in kWh/100km:
T_EPKW_120, Double
- Funktionaler Zusammenhang Verbrauch und Ebenheit (IRI)
 - k-Wert Funktion PKW 0-20 km/h: k_PKW_0_20, Double
 - k-Wert Funktion PKW >20 km/h: k_PKW_20_130, Double
 - d-Wert Funktion PKW 0-20 km/h: d_PKW_0_20, Double
 - d-Wert Funktion PKW >20 km/h: d_PKW_20_130, Double
 - k-Wert Funktion LKW 0-20 km/h: k_LKW_0_20, Double
 - k-Wert Funktion LKW 20-60 km/h: k_LKW_20_60, Double
 - k-Wert Funktion LKW 60-80 km/h: k_LKW_60_80, Double
 - d-Wert Funktion LKW 0-20 km/h: d_LKW_0_20, Double
 - d-Wert Funktion LKW 20-60 km/h: d_LKW_20_60, Double
 - d-Wert Funktion LKW 60-80 km/h: d_LKW_60_80, Double
- Zustandsprognose Ebenheit (IRI)
 - Auswahl Zustandsmerkmal (IRI, AUN, sW-Wert): LE_Merkmal, Code (AUN, IRI, sW)
 - Jährliche Änderungsrate Längsebenheit nach Neubau/Erneuerung: Delta_LE_NM_Nebau, Double
 - Jährliche Änderungsrate Längsebenheit nach Verstaerkung: Delta_LE_NM_Verstaerkung
- Baustelleninformationen
 - Unfallkennzahlen vs. Baustellenführung (Vorlage)
 - Staugeschwindigkeit in km/h: V_Stau, Integer
 - Anzahl Tage jeweils für Auf- und Abbau der Baustelle je km Baustellenlänge: t_Baustelle, Double
- Wirtschaftlichkeitsparameter

- Valorisierung [%]: W_V, Double
 - Diskontierungszinssatz [%]: W_D, Double
- **Modul LANGZEITWIRKUNG:** Hier erfolgt die GWP-Einsparung über Zeit durch den verbesserten Zustand je Variante. Hier sind keine zusätzlichen Eingaben notwendig, ausser die Auswahl, ob diese Berechnung für das Projekt stattfindet (siehe User-stories 7).
 - **Modul ERGEBNISSE:** Grafische und tabellarische Darstellung der Ergebnisse (Beispiel im Ökobilanz-Excel vorhanden). Die Vorgaben für ein Dashboard werden noch erarbeitet.

2.5 Berechnungen

Auf der Grundlage der Eingangsdaten werden entsprechende Berechnungen durchgeführt.

- Berechnung Kennwerte (Zwischenergebnisse) je Massnahme innerhalb einer Variante (siehe SABINA_V02.ipynb). Diese Berechnung besteht aus folgenden Teilberechnungen:
 - Berechnung der Wirkungen durch die Massnahme
 - Einfluss IRI auf Treibstoff- und Energieverbrauch vor, während und nach der Massnahme
 - Berechnung Staustunden (zusätzliche Staustunden) durch die Massnahme
 - Berechnung Treibstoffverbrauch allgemein in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Zustand
 - Dauer der Massnahme (Baustelle)
 - Berechnung Verkehrsbelastung während der Massnahme für die einzelnen Fahrzeugkategorien
 - Berechnung zusätzlicher Treibstoff- und Energieverbrauch während der Massnahme
 - Berechnung der Langzeitwirkungen durch die Massnahme

- Modellierung GWP-Effekt durch verbesserten Strassenzustand bis zur Nachfolgemassnahme
- Berechnung zur Umrechnung von Längsebenheitsindikator AUN (DE) und sW (CH) in den IRI-Wert (siehe SAINBA_Add_AUN_IRI_V01.ipynb). Diese Berechnung ist dann auszuführen, wenn als Längsebenheitskennwert AUN oder sW ausgewählt wurden.
 - Umrechnung AUN-Werte in IRI-Werte
 - Eingangsdaten für Prognose Längsebenheit unter Modul EINSTELLUNGEN
- Berechnung der Wirtschaftlichkeitsindikatoren für die Basisvariante und die Vergleichsvariante (siehe SABINA_Add_Wirtschaft_V01.ipynb)

3 USER-STORIES

Die nachfolgenden User-stories geben einen Überblick über die Funktionalität des SABINA Bilanzrechners. Sie gliedern sich nach der in Kapitel 2.3 beschriebenen Struktur.

User-stories 1: Start Page

- US1.1 Nach der Eingabe der SABINA Domain in einen Internetbrowser (MS Edge, Chrome oder Firefox) öffnet sich die Startseite des SABINA-Bilanzrechners. Die Anwenderin sieht das SABINA-Logo und erhält grundlegende Informationen über den Zweck und die Zielsetzung des SABINA-Bilanzrechners sowie die Versionsnummer.
- US1.2 Durch das Klicken auf den Start-Button gelangt die Anwenderin zur Working Page, die sich in einem neuen Browserfenster öffnet. Der Workspace auf dieser Working Page ist dann noch leer.

User-stories 2: Working Page

- US2.1 Die Anwenderin kann ein neues Projekt anlegen und dieses lokal auf ihrem Computer entweder als MS-Excel-Projektdatei oder als CSV-Projektdatei speichern. Beim Anlegen eines neuen Projekts öffnet sich automatisch das Modul EINGABE, wo die entsprechenden Informationen des Projekts eingegeben werden.
- US2.2 Die Anwenderin kann ein bestehendes Projekt, welches auf ihrem Computer gespeichert ist, durch die Auswahl der Projektdatei öffnen bzw. hochladen. Beim Laden eines bestehenden Projekts öffnet sich das Modul EINGABE mit den bereits hinterlegten Informationen.

- US2.3 Die Anwenderin ist in der Lage von der Working Page alle Module aufzurufen, vorausgesetzt ein Projekt wurde zuvor neu angelegt oder geöffnet bzw. hochgeladen. Die Working Page bleibt dabei geöffnet und angewählte Module öffnen sich jeweils in einem eigenen Arbeitsbereich (Register, nicht als eigene Browserseite).
- US2.4 Die Anwenderin kann das Projekt speichern. Die alte Projektdatei wird automatisch mit den Änderungen und Ergänzungen ohne Warnung überschrieben. Beim Speichern des Projekts werden auch alle Eingaben und Änderungen in den Modulen gespeichert. Ein Hinweis auf fehlende Eingangsdaten wird beim Gesamtspeichern nicht gegeben.
- US2.5 Die Anwenderin kann das Projekt schliessen. Damit werden alle Module geschlossen. Die *leere* Working Page bleibt geöffnet. Die Anwenderin wird gewarnt, wenn sie das Projekt oder einzelne Moduleingaben noch nicht gespeichert hat. Sie hat die Möglichkeit, das Projekt bzw. die Eingaben in den Modulen noch zu speichern, wenn sie auf *Abbrechen* klickt. Klickt sie auf *Ohne Speichern schliessen*, schliesst sich die Working Page und die nicht gespeicherten Änderungen bzw. Eingaben gehen verloren.
- US2.6 Schliesst die Anwenderin das Browserfenster oder den gesamten Browser, wird sie gewarnt, wenn sie das Projekt oder einzelne Moduleingaben noch nicht gespeichert hat. Sie hat die Möglichkeit, das Projekt bzw. die Eingaben in den Modulen noch zu speichern, wenn sie auf *Abbrechen* klickt. Klickt sie auf *Ohne Speichern schliessen*, schliesst sich die Working Page und die nicht gespeicherten Änderungen bzw. Eingaben gehen verloren.
- US2.7 Die Anwenderin kann die Berechnungen ausführen. Sollten Eingangsdaten fehlen, erhält sie eine Warnung und einen Hinweis über die fehlenden Eingangsdaten. Erfolgt eine Berechnung, erhält sie den Hinweis, dass ihre Berechnungen abgeschlossen wurden, sobald die Ergebnisse zur Verfügung stehen.
- US2.8 Die Anwenderin kann einen Ergebnisbericht mit den Ergebnissen der erfolgreichen Berechnungen und der Eingangsdaten nach dem Ausführen der Berechnungen als PDF-Dokument herunterladen.

User-stories 3: Modul EINGABE

- US3.1 Die Anwenderin kann die notwendigen Daten und Informationen über das Projekt eingeben. Die Eingabemöglichkeiten sind in Kapitel 2.4 beschrieben.

- US3.2 Das Modul EINGABE öffnet sich automatisch beim Speichern (Anlegen) eines neuen Projekts oder beim Laden eines bestehenden Projekts.
- US3.3 Die Anwenderin kann die eingegebenen Daten überprüfen und speichern. Die Daten werden in der Projektdatei gespeichert. Fehlen Eingangsdaten wird die Anwenderin auf die fehlende Information hingewiesen.
- US3.3 Die Anwenderin kann das Modul NICHT schliessen, da sie die zentrale Arbeitsseite des Projekts darstellt. Das Modul kann nur über das Schliessen des Projekts geschlossen werden (siehe Abschnitt US2.5)

User-stories 4: Modul MASSNAHMEN

- US4.1 Nach dem Öffnen des Moduls kann die Anwenderin die notwendigen Daten und Informationen über die Massnahmen eingeben. Die Eingabemöglichkeiten sind in Kapitel 2.4 beschrieben. Die Eingabemaske im Modul erlaubt zunächst die Eingabe einer einzigen Massnahme, sofern nicht bereits mehrere Massnahmen zuvor eingegeben wurden.
- US4.2 Die Anwenderin kann entweder die Basisvariante oder die Vergleichsvariante auswählen.
- US4.3 Beim erstmaligen Aufruf des Moduls im Rahmen eines neuen Projekts werden jeweils *eine* Massnahme in der Basisvariante und *eine* Massnahme in der Vergleichsvariante angelegt.
- US4.4 Die Anwenderin kann durch Klicken auf *Weitere Massnahme* eine zusätzliche (neue) Massnahme in der jeweils zuvor gewählten Variante eingeben. Es können maximal 5 Massnahmen für jede Variante eingeben werden.
- US4.5 Die Anwenderin kann die eingegebenen Daten überprüfen und speichern. Die Daten werden in der Projektdatei gespeichert. Fehlen Eingangsdaten, wird die Anwenderin auf die fehlende Information hingewiesen.
- US4.6 Die Anwenderin kann das Modul schliessen. Die Anwenderin wird gewarnt, wenn einzelne Moduleingaben noch nicht gespeichert wurden. Sie hat die Möglichkeit, die Eingaben in den Modulen noch zu speichern, wenn sie auf *Abbrechen* klickt. Klickt sie auf *Ohne Speichern schliessen*, schliesst sich das Modul und die nicht gespeicherten Änderungen bzw. Eingaben gehen verloren.

User-stories 5: Modul DATEN

- US5.1 Nach dem Öffnen des Moduls sehen die Anwenderin (und Administratorin) die Version sowie das aktuelle Datum der Datendatei. Die Eingabemöglichkeiten sind in Kapitel 2.4 beschrieben.
- US5.2 Die Administratorin kann im Modul DATEN eine neue Datendatei (CSV-Datei) mit den neuen bzw. aktualisierten GWP-Werten hochladen. Durch das Hochladen wird die alte Datendatei mit der neuen Datendatei ersetzt. Die Funktion wird durch die Eingabe eines Administratorinnenpasswortes aktiviert, wenn die Administratorin auf *Neue Datendatei hochladen* klickt und das korrekte Passwort eingibt.
- US4.2 Die Anwenderin kann die Datendatei (CSV-Datei) herunterladen.

User-stories 6: Modul EINSTELLUNGEN

- US6.1 Nach dem Öffnen des Moduls kann die Anwenderin die notwendigen Daten und Informationen eingeben.
- US6.2 Die Anwenderin kann die eingegebenen Daten überprüfen und speichern. Die Daten werden in der Projektdatei gespeichert. Fehlen Eingangsdaten wird sie auf die fehlende Information hingewiesen. Ist die Summe der eingegebenen Stundenwerte für die Tagesganglinie Verkehr $\leq$ 100% erhält die Anwenderin eine entsprechende Warnung bzw. Information.
- US6.3 Die Anwenderin kann sich die Tagesganglinie des Verkehrs graphisch darstellen lassen (siehe SABINA_V02.ipynb, Tagesganglinie Verkehr).
- US6.4 Die Anwenderin kann sich den Treibstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für PKW und LKW sowie den Energieverbrauch für E-PKW graphisch darstellen lassen (siehe SABINA_V02.ipynb, Kontrolle Eingangsdaten Treibstoff und Energieverbrauch).
- US6.5 Die Anwenderin kann das Modul schließen. Sie wird gewarnt, wenn einzelne Moduleingaben noch nicht gespeichert wurden. Sie hat die Möglichkeit, die Eingaben in den Modulen noch zu speichern, wenn sie auf *Abbrechen* klickt. Klickt sie auf *Ohne Speichern schließen*, schliesst sich das Modul und die nicht gespeicherten Änderungen bzw. Eingaben gehen verloren.

User-stories 7: Modul LANGZEITWIRKUNG

- US7.1 Nach dem Öffnen des Moduls erhält die Anwenderin eine generelle Information über die Verwendung des Moduls.

- US7.2 Die Anwenderin kann auswählen, ob eine Berechnung der Langzeitwirkungen durchgeführt wird. Die Berechnung erfolgt dann gemeinsam mit den Berechnungen der anderen Wirkungen und die Ergebnisse werden im Modul ERGEBNIS freigeschaltet.
- US7.3 Die Anwenderin kann alle Einstellungen speichern. Die wird gewarnt, wenn diese nicht gespeichert wurden. Sie hat die Möglichkeit die Einstellungen in den Modulen noch zu speichern, wenn sie auf *Abbrechen* klickt. Klickt sie auf *Ohne Speichern schliessen*, schliesst sich das Modul und die nicht gespeicherten Änderungen bzw. Eingaben gehen verloren.